



TESIS - RE 092314

ANALISIS KELANGKAAN ENERGI TERBARUKAN DI EROPA BERDASARKAN PENDEKATAN AMBANG BATAS

HANDRIYANTI DIAH PUSPITARINI

3312 201 902

DOSEN PEMBIMBING

BENOIT HINGRAY

DOSEN CO-PEMBIMBING

BAPTISTE FRANÇOIS

DAMIEN RAYNAUD

JEAN-DOMINIQUE CREUTIN

Prof. Ir. WAHYONO HADI, MSc. PhD

PROGRAM MAGISTER

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



TESIS - RE 092314

ANALISIS KELANGKAAN ENERGI TERBARUKAN DI EROPA BERDASARKAN PENDEKATAN AMBANG BATAS

HANDRIYANTI DIAH PUSPITARINI

3312 201 902

DOSEN PEMBIMBING

BENOIT HINGRAY

DOSEN CO-PEMBIMBING

BAPTISTE FRANÇOIS

DAMIEN RAYNAUD

JEAN-DOMINIQUE CREUTIN

Prof. Ir. WAHYONO HADI, MSc. PhD

PROGRAM MAGISTER

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



TESIS - RE 092314

CLIMATE-RELATED ENERGY SCARCITY ANALYSIS IN EUROPE USING A THRESHOLD BASED APPROACHED

HANDRIYANTI DIAH PUSPITARINI

3312 201 902

SUPERVISOR

BENOIT HINGRAY

CO-SUPERVISOR

BAPTISTE FRANÇOIS

DAMIEN RAYNAUD

JEAN-DOMINIQUE CREUTIN

Prof. Ir. WAHYONO HADI, MSc. PhD

MAGISTER PROGRAM

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING

SEPULUH NOPEMBER INSTITUT OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2015



TESIS - RE 092314

ANALISIS KELANGKAAN ENERGI TERBARUKAN DI EROPA BERDASARKAN PENDEKATAN AMBANG BATAS

HANDRIYANTI DIAH PUSPITARINI
3312 201 902

DOSEN PEMBIMBING
BENOIT HINGRAY

DOSEN CO-PEMBIMBING
BAPTISTE FRANÇOIS
DAMIEN RAYNAUD
JEAN-DOMINIQUE CREUTIN
Prof. Ir. WAHYONO HADI, MSc. PhD

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

**ANALISIS KELANGKAAN ENERGI TERBARUKAN DI EROPA BERDASARKAN
PENDEKATAN AMBANG BATAS**

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)**

di

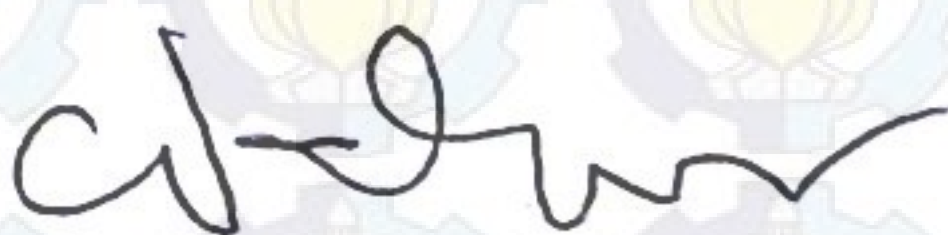
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

**HANDRIYANTI DIAH PUSPITARINI
3312 201 902**

**Tanggal Ujian : 06 Mei 2015
Periode Wisuda : September 2015**

Disetujui Oleh



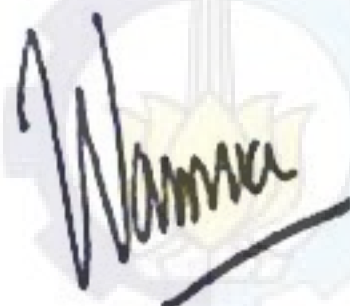
**1. Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc., Ph.D
NIP. 19500114 197903 1 001**

(Pembimbing)



**2. Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.
NIP. 19660116 199703 1 001**

(Penguji)



**3. IDAA Warmadewanthi, ST, MT, Ph.D
NIP. 19750212 199903 2 001**

(Penguji)



**4. Arie Dipareza Syafei, ST., MPEM, Ph.D
NIP. 19820119 200501 1 001**

(Penguji)



**Prof. Dr. Adi Sugengjanto, MT.
NIP. 19640405 199002 1 001**

ANALISIS KELANGKAAN ENERGI TERBARUKAN DI EROPA BERDASARKAN PENDEKATAN AMBANG BATAS

Nama : Handriyanti Diah Puspitarini
NRP : 3312.201.902
Pembimbing : Benoit Hingray
Co-Pembimbing : Baptiste François, Damien Raynaud,
Jean-Dominique Creutin, dan Prof. Ir.
Wahyono Hadi, MSc. PhD

ABSTRAK

Sumber energi terbarukan dapat digunakan sebagai pengganti sumber energi tidak terbarukan seperti batu bara dan minyak (bahan bakar fosil) untuk mengurangi emisi karbon dalam melengkapi kebutuhan energi. Dalam penelitian ini, energi tersebut dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau Angin (PLTB), dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang datanya dimulai dari 1980 hingga 2012 di 12 negara yang tersebar di benua Eropa yaitu Norwegia, Finlandia, Yunani, Spanyol (Andalusia dan Galisia), Tunisia, Prancis, Rumania, dan Belarusia. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakter dan kelangkaan energi yang didasarkan pada fluktuasi sumber energi.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah serial data produksi dan kebutuhan energi yang diperoleh dari konversi data meteorologi pada setiap sumber energi seperti kecepatan angin, radiasi matahari, temperatur, dan debit sungai. Analisis kelangkaan energi dilakukan melalui perhitungan statistika dasar, RRV (Reliability, Resiliency, and Vulnerability), dan indeks kelangkaan energi. Indeks ini didefinisikan sama dengan metode indeks kekeringan presipitasi yang didasarkan pada data yang telah distandarisasi dan ambang batas (garis ambang batas konstan atau harian).

Berdasarkan hasil perhitungan melalui garis ambang batas harian, energi terendah yang dihasilkan dari PLTS terjadi pada 1982, 1997, dan 2011, PLTA terjadi pada 1991 dan 1996, dan PLTB terjadi pada 1996 dan 2000. Sedangkan berdasarkan garis ambang batas konstan, produksi dari PLTA mencapai titik terendah pada 1989, 1992, dan 2003, PLTB pada 1994, 2009, dan 2012, dan PLTS pada setiap musim dingin. Selain itu, berdasarkan grafik indeks kelangkaan energi, pada 1995 hingga 1997, produksi energi mencapai titik terendah pada seluruh sumber di seluruh wilayah studi. Kelebihan kebutuhan energi di seluruh negara terjadi pada tahun 2005.

Kata kunci: Air, Ambang Batas, Angin, Energi, Surya

CLIMATE-RELATED ENERGY SCARCITY ANALYSIS IN EUROPE USING A THRESHOLD BASED APPROACH

Name : Handriyanti Diah Puspitarini
NRP : 3312.201.902
Supervisor : Benoit Hingray
Co-Supervisor : Baptiste Francois, Damien Raynaud,
Jean-Dominique Creutin, dan Prof. Ir.
Wahyono Hadi, MSc. PhD

ABSTRACT

Renewable energy resources can be used as substitutes of non-renewable sources such as coal and oil (fossil fuel) in order to get lower carbon emission in completing the energy demand. In this report, the renewable resources are solar power, wind power, and hydropower from 1980 to 2012 in twelve regions among European countries; Norway, Finland, Greece, Spain (Andalucia and Galicia), Tunisia, France, Romania, and Belarus. The aim of this report is to characterize and analyze the energy scarcity due to the co-fluctuation between those intermittent sources.

We used the chronological time series of energy production obtained for each intermittent energy from converted meteorological variables data such as wind speed, irradiance, temperature, and river flow. The analysis of energy scarcity in this report was made from basic statistic, correlation analysis, RRV (Reliability, Resiliency, and Vulnerability), and energy scarcity index. This index is defined in a similar way than the precipitation drought index from standardized data and a given scarcity threshold (constant threshold or moving threshold defined on calendar basis).

The result showed that solar power generation had the lowest production in whole regions on 1982, 1997, and 2011 using moving threshold. Besides, Hydropower generation was low during 1991 and 1996; and wind power scarcity production was on 1996 and 2000. On constant threshold, hydropower was low on 1989, 1992, and 2003; wind power scarcity was on 1994, 2009, and 2012. However, solar power was always below the threshold production in every winter. Furthermore, based on the plot of scarcity index, on 1995 to 1997, the energy production was lower for all sources over the whole domain. The highest demand overload for all regions happened on 2005.

Key words: Energy, Hydro, Solar, Threshold, Wind

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberi ilmu, perlindungan, bimbingan, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penyusunan tesis ini dapat terselesaikan. Tesis dengan judul “Analisis Kelangkaan Energi Terbarukan yang Berhubungan dengan Perubahan Cuaca di Eropa Berdasarkan Pendekatan Ambang Batas”, merupakan salah satu usaha untuk memperoleh gelar kesarjanaan Strata-2 (S2) di Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada:

1. Benoit Hingray, Jean-Dominique Creutin, Baptiste François, dan Damien Raynaud sebagai tim riset sekaligus pembimbing dan co-pembimbing dari Université Joseph Fourier (UJF), Prancis yang telah meluangkan waktu untuk membimbing hingga seluruh riset dan penulisan tesis ini terselesaikan
2. Prof. Ir. Wahyono Hadi, MSc. PhD sebagai co-pembimbing di Teknik Lingkungan ITS yang telah membimbing dan memberi pengarahan hingga penulisan tesis berbahasa Indonesia ini terselesaikan
3. Seluruh tim *FP7 project COMPLEX* yang telah membantu pengumpulan data dalam tesis ini
4. LTHE – HMCI dan CNRS yang telah menerima penulis sebagai tim risetnya selama 5 bulan
5. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Pascasarjana ITS, dan Kementerian Luar Negeri Prancis yang telah memfasilitasi seluruh proses dan pembiayaan selama studi S2
6. Ibu, bapak, adik, dan seluruh keluarga besar yang telah memberi motivasi dan doanya hingga tesis ini selesai disusun
7. Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T., Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., dan Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl.SE, MSc, PhD selaku penanggungjawab S2 TL ITS dan dosen wali yang selalu memberi semangat untuk menyelesaikan S2 ini
8. Teman-teman LTHE – HMCI dan *Hydrohasard* yang selalu memberi dukungan untuk menyelesaikan studi S2 meskipun jauh dari keluarga
9. Teman-teman PPI Grenoble dan DDIP sebagai pengganti keluarga yang selalu siap menjadi tempat curhat
10. Ulvi, Santya, Siti, Triyono, Hadi, Mimin, dan Yevi yang selalu menghibur dan menjadi tempat curhat meskipun hanya melalui *whatsapp*

11. Teman-teman Teknik Lingkungan terutama angkatan 2009 yang selalu memberi semangat untuk terus rajin mengerjakan tesis dan lulus di bulan September 2015 ini
12. Seluruh dosen dan karyawan di Teknik Lingkungan ITS, UJF, serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu

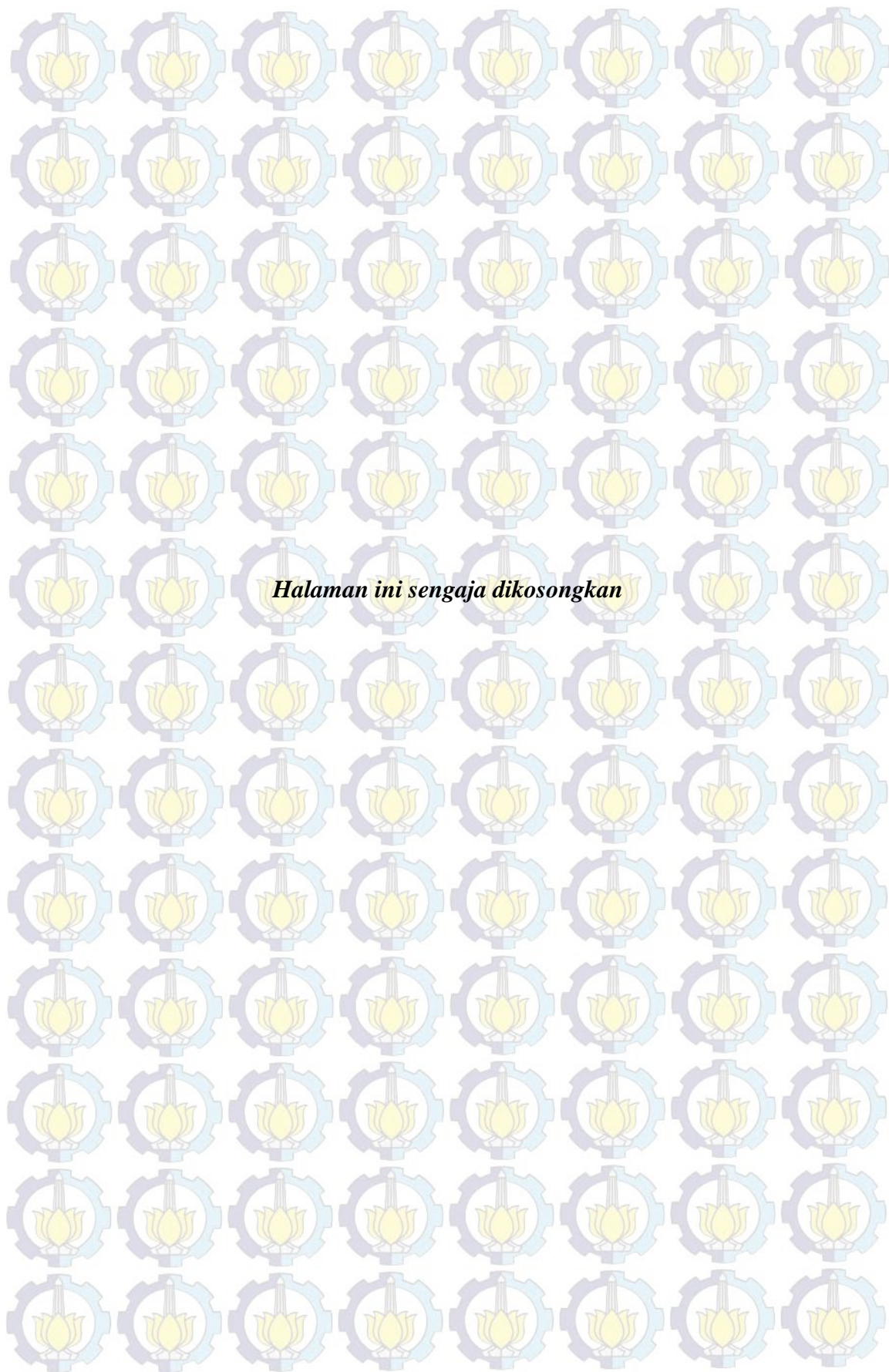
Semoga tesis ini dapat bermanfaat sebagai masukan bagi para pembaca sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan perubahan lebih lanjut.

Surabaya, Mei 2015

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
1.3.1 Tujuan Penelitian	2
1.3.2 Manfaat Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sumber Energi Terbarukan yang Dapat Digunakan sebagai Sumber Produksi Energi	5
2.2 Fluktuasi Sumber Energi Terbarukan	7
2.3 Fluktuasi Kebutuhan Energi	8
2.4 Aplikasi Sumber Energi Terbarukan sebagai Sumber Energi di Indonesia	9
2.5 Gambaran Umum Daerah Penelitian	9
BAB 3 METODE PENELITIAN	13
3.1 Pengambilan Data	14
3.2 Analisis Data	15
3.2.1 Konversi Energi	15
a. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)	15
b. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	17
c. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	18
3.2.2 Pemodelan Kebutuhan Energi	19
3.2.3 Perhitungan Ambang Batas Produksi Energi dan Kebutuhan Energi	20
3.2.4 Analisis <i>Reliability</i> , <i>Resiliency</i> , dan <i>Vulnerability</i> (RRV)	24
BAB 4 HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Pemodelan Kebutuhan Energi	27
4.2 Analisis Statistik	33
4.3 Analisis Produksi Energi	40
4.3.1 Analisis Kinerja Produksi Energi	40
4.3.2 Analisis Indeks Kelangkaan Energi	44
4.4 Rekomendasi	54
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN A	65
LAMPIRAN B	73



Halaman ini sengaja dikosongkan

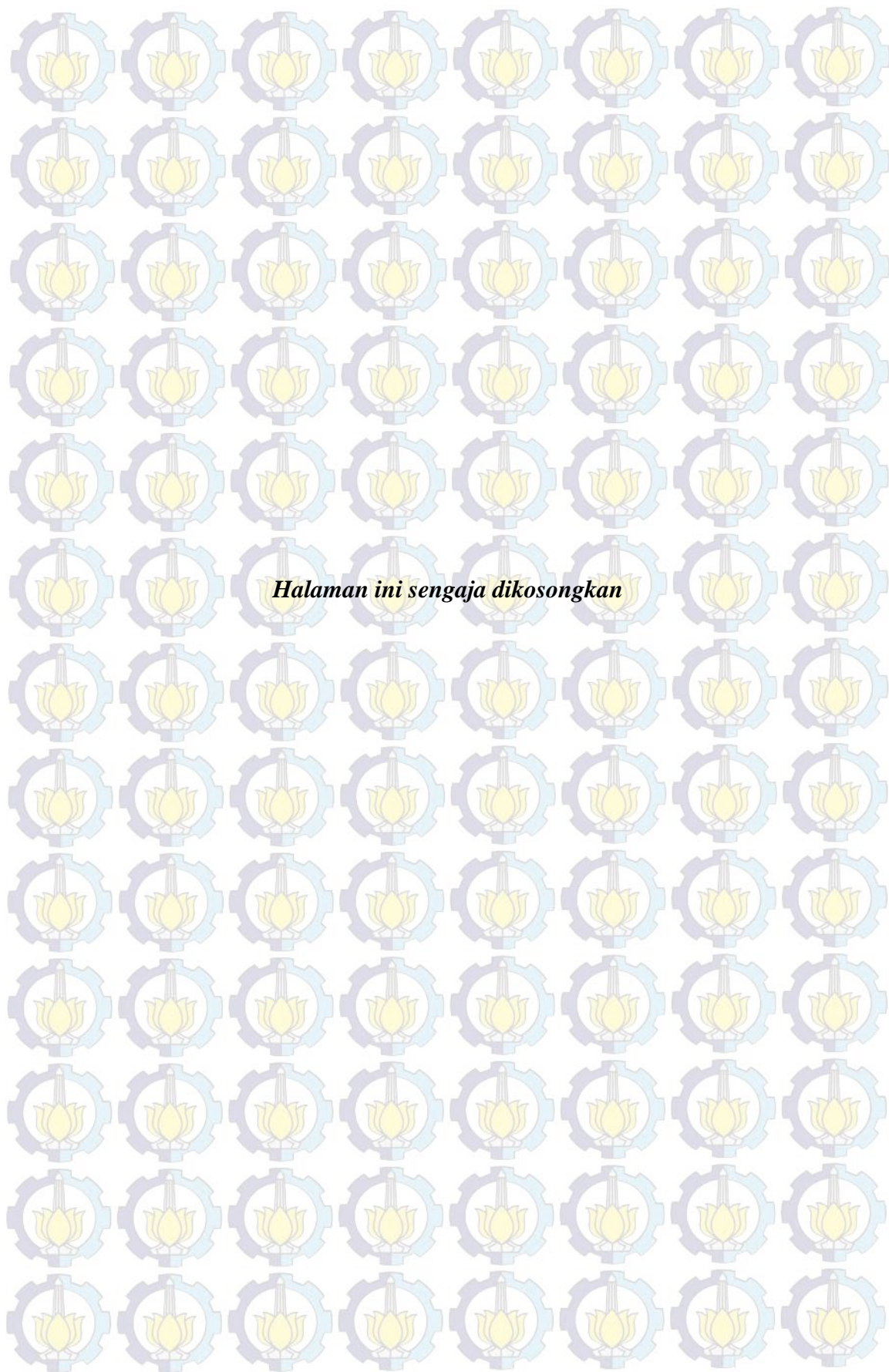
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kelebihan dan kelemahan sistem pembangkit energi listrik tenaga energi terbarukan	6
Tabel 2.2 Potensial energi dan kapasitas terpasang di Indonesia	9
Tabel 3.1 Indeks lingkungan dalam konversi data energi angin	16
Tabel 3.2 Produksi energi dari setiap sumber di Norwegia beserta garis ambang batasnya	21
Tabel 3.3 Pembentukan garis ambang batas harian di Norwegia pada setiap sumber energi	22
Tabel 4.1 Penghapusan pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap kebutuhan energi	27
Tabel 4.2 Grafik kebutuhan energi berdasarkan perubahan temperatur	30
Tabel 4.3 Fungsi regresi linear di setiap wilayah	32
Tabel 4.4 Hasil analisis statistika dasar	34
Tabel 4.5 Koefisien korelasi produksi dan kebutuhan energi menggunakan data yang telah terstandarisasi	37
Tabel 4.6 Koefisien korelasi antara seluruh produksi dan kebutuhan energi	40
Tabel 4.7 Hasil perhitungan resiliency dan durasi terjadinya kelangkaan energi	42
Tabel 4.8 Hasil perhitungan intensitas kelangkaan energi selama 33 tahun	43
Tabel 4.9 Daftar periode kelangkaan energi yang terjadi serentak di seluruh wilayah studi	50
Tabel 4.10 Hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan garis ambang batas harian	53
Tabel 4.11 Hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan garis ambang batas konstan	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Dua belas negara yang digunakan dalam studi kasus.....	11
Gambar 3.1 Sistematika penelitian.....	14
Gambar 3.2 Kurva pembentukan energi pada PLTB	17
Gambar 3.3 Kurva energi dari PLTB per tiga jam.....	17
Gambar 3.4 Contoh data harian produksi energi dari PLTS di Norwegia.....	20
Gambar 3.5 Contoh indeks kelangkaan energi dari PLTS di Norwegia pada tahun 1980-1985	23
3.6 Contoh metode mesh plot.....	23
Gambar 3.7 Contoh periode terjadinya kelangkaan energi pada PLTS di Belarusia.....	24
Gambar 4.1 Hasil <i>Pettitt test</i> di Italia	28
Gambar 4.2 Data kebutuhan energi yang telah di koreksi	29
Gambar 4.3 Grafik hubungan kebutuhan energi dan suhu di setiap negara	31
Gambar 4.4 Grafik perhitungan rata-rata harian data antar tahun pada produksi energi.....	36
Gambar 4.5 Plot angka-angka biner menggunakan metode <i>mesh plots</i> pada PLTS, PLTA, dan PLTB (garis ambang batas harian)	44
Gambar 4.6 Plot angka-angka biner menggunakan metode <i>mesh plots</i> pada PLTS, PLTA, dan PLTB (garis ambang batas konstan).....	45
Gambar 4.7 Grafik rata-rata kelangkaan energi pada PLTA, PLTS, PLTB, dan kebutuhan energi (garis ambang batas konstan)	48
Gambar 4.8 Grafik rata-rata kelangkaan energi pada PLTA, PLTS, PLTB, dan kebutuhan energi (garis ambang batas harian).....	49
Gambar 4.9 Kombinasi energi dari PLTS dan PLTB menggunakan garis ambang batas harian	51
Gambar 4.10 Kombinasi energi dari PLTS dan PLTB menggunakan garis ambang batas konstan (atas) dan harian (bawah)	52



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak bumi dan batu bara merupakan sumber utama pembangkit listrik, tetapi keduanya menghasilkan karbon dioksida (CO₂) yang dapat mempercepat perubahan iklim atau pemanasan global apabila gas tersebut berakumulasi di atmosfer (Lackner, 2009). Jumlah karbon dioksida akan meningkat sebanyak 2,4% per tahun (Pittock, 2009). Oleh karena itu, mitigasi yang merupakan salah satu cara untuk mengurangi efek tersebut harus segera dilakukan (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

Berdasarkan *Directive of The European Parliament and of The Council* amandemen *Directive 98/70/EC* dan *2009/28/EC* (2012), Eropa berusaha untuk membuat keputusan dalam penggunaan energi terbarukan sebagai bagian dari penghasil energi pada tahun 2020. Seluruh negara di Eropa yang termasuk *European Union* (EU) harus menggunakan 20% energi terbarukan dari total seluruh sumber energi, 10% energi terbarukan sebagai bahan bakar motor, dan 6% pengurangan gas penyebab efek rumah kaca yang digunakan di transportasi dan pabrik.

Energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber produksi energi adalah panas matahari, biomassa, tenaga angin, geothermal, dan arus sungai. Dari sumber-sumber tersebut, yang paling banyak digunakan sebagai pembangkit listrik adalah tenaga angin, panas matahari, dan air karena energi potensial dari sumber-sumber tersebut dapat ditemukan di mana pun. Akan tetapi, sumber-sumber energi ini berfluktuasi berdasarkan pengaruh variabel meteorologi seperti presipitasi, temperatur, radiasi matahari, dan kecepatan angin (de Boer dan Bressers, 2013).

Energi yang berasal dari tenaga air (Pembangkit Listrik Tenaga Air atau PLTA) bergantung pada presipitasi dan aliran sungai. PLTA telah dikembangkan di seluruh dunia sejak 1700an (Kumar *et al.*, 2011). Energi yang berasal dari radiasi matahari (Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS) berfluktuasi sesuai dengan intensitas radiasi musiman dan harian (Kothe *et al.*, 2013).. Sedangkan energi yang berasal dari angin (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau PLTB) mengalami fluktuasi berdasarkan kecepatan angin setiap jam yang terjadi di suatu wilayah (Nawri *et al.*, 2014).

Fluktuasi-fluktuasi tersebut dapat menyebabkan terjadinya kelangkaan energi di Eropa. Oleh karena itu, penelitian ini terpusat pada analisis kelangkaan energi yang didasarkan pada

statistika dasar, RRV (*Reliability, Resiliency, and Vulnerability*), dan indeks kelangkaan energi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjabaran fluktuasi sumber energi dalam PLTA, PLTS, PLTB, serta kebutuhan energi, rumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah karakteristik fluktuasi sumber energi dan kebutuhan energi yang terjadi di Eropa?
2. Pada periode kapan sajakah kelangkaan energi yang disebabkan fluktuasi sumber energi dan tingginya konsumsi energi terjadi di Eropa?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan masalah, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik fluktuasi sumber energi dan kebutuhan energi yang terjadi di Eropa
2. Menganalisis periode terjadinya kelangkaan energi yang disebabkan fluktuasi sumber energi dan tingginya konsumsi energi di Eropa

1.3.2 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat menjadi acuan di bidang produksi energi terutama bidang kelangkaan energi
2. Dapat menjadi usulan untuk memprediksi terjadinya kelangkaan energi di masa yang akan datang dengan memperhatikan karakteristik fluktuasi sumber energi

1.4 Ruang Lingkup

Sistem PLTA yang digunakan pada penelitian ini adalah *Run of River* (RoR) dengan mempertimbangkan kondisi wilayah yang tidak memungkinkan untuk membangun sebuah tempat penampungan air yang besar (International Renewable Energi Agency, 2012). Sedangkan sistem PLTS yang digunakan adalah *Photovoltaic panels* (PV) karena sistem ini mulai banyak digunakan di Eropa sejak 2008 (Grossmann *et al.*, 2013).

Selain itu, karena model kebutuhan energi bukan merupakan tujuan utama penulisan tesis ini dan telah dikembangkan dalam proyek COMPLEX, maka prinsip dasar pembentukan model untuk mengetahui karakter kebutuhan energi di kedua belas negara selama delapan tahun (2006-2013) hanya dijelaskan secara singkat pada bagian metodologi penelitian. Data kecepatan angin, radiasi matahari, temperatur, dan aliran sungai yang diubah menjadi data PLTA, PLTB, dan PLTS merupakan data selama 33 tahun (1980-2012).

Konversi energi pada PLTS didasarkan pada persamaan yang bergantung pada perubahan temperatur, kapasitas generator, dan intensitas radiasi matahari. Konversi energi pada PLTB didasarkan pada kurva konversi energi dimana jumlah energi yang dapat diproduksi (sebagai variabel dependen dalam kurva) dapat langsung diperoleh dari kecepatan angin dalam kurva. Sedangkan konversi energi pada PLTA didasarkan pada kondisi eksisting setiap unit pembangkit listrik dimana produksi energi dapat langsung diperoleh nilainya dari data debit air dari setiap unit.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sumber Energi Terbarukan yang Dapat Digunakan sebagai Sumber Produksi Energi

Terdapat tiga jenis PLTA yaitu *Run-of-the river (RoR)*, *Reservoir*, dan *Pump-storage* (Tabel 2.1). RoR adalah sistem PLTA yang tidak dapat dijadwalkan penggunaannya karena tidak terdapat sistem penyimpanan. Reservoir menggunakan bendungan untuk menyimpan air dalam jumlah besar yang dapat digunakan ketika jumlah air terbatas. Selain itu, reservoir dapat digunakan untuk menyeimbangkan produksi energi dari tenaga angin dan panas matahari, sumber irigasi, tempat wisata, serta pemberdayaan ekologi. Perpindahan energi pada sistem reservoir bergantung pada ketinggian bendungan yang akan mempengaruhi jumlah energi yang dihasilkan oleh jatuhnya air (International Renewable Energi Agency, 2012). *Pump-storage*, di sisi lain, menggunakan pompa listrik untuk memindahkan air dari sungai atau reservoir ke unit penyimpanan (de Boer dan Bressers, 2013).

Energi yang berasal dari panas matahari (PLTS) pada Tabel 2.1 dibagi dalam dua jenis yaitu *Photovoltaic panels (PV)* dan *Concentrating Solar Power (CSP)*. Perbedaan keduanya terdapat pada alat yang digunakan untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi. PV dapat langsung mengubah radiasi menjadi listrik menggunakan materi semikonduktor. Sedangkan CSP mengumpulkan radiasi terlebih dahulu melalui pipa tipis, cermin, atau piringan-piringan. Energi panas tersebut akan memanaskan cairan dalam pipa penghantar panas dan memproduksi energi mekanik untuk menghasilkan listrik atau *Solar Thermal Electricity (STE)* (Ralph E.H *et al.*, 2007). Sejak 2008, PV menjadi unit pembangkit listrik tenaga radiasi yang paling banyak digunakan (meningkat lebih dari 70% per tahun) karena proses produksi dan perawatan unitnya hanya \$0,7 per *Watt-peak* dan dapat memproduksi 25% dari konsumsi global (4 TW/tahun) (Grossmann *et al.*, 2013).

Sistem pembangkit energi lainnya berasal dari angin (PLTB) yang memanfaatkan pergerakan turbin pada kincir angin. Teknologi ini sesuai untuk area yang memiliki lahan terbuka yang luas karena membutuhkan lahan yang lebih untuk membangun kumpulan kincir angin yang biasa disebut *wind farm* dan sesuai untuk area pinggir pantai yang dapat digunakan untuk membangun kincir angin lepas pantai. Moriarty dan Honnery (2012) dan Ralph E.H *et al.* (2007) telah membuktikan bahwa sistem ini dapat menggantikan 18% konsumsi minyak bumi dan 11% konsumsi gas alam.

Tabel 2.1 Kelebihan dan kelemahan sistem pembangkit energi listrik tenaga energi terbarukan

Energi Terbarukan		Produksi Energi (EJ/yr)	Kelebihan	Kelemahan
PLTB		600 ^[1]	Sedikit efek visual dan kebisingan	Membutuhkan banyak lahan terbuka
PLTS	<i>Photovoltaic Electricity (PV)</i>	2592 (ekonomi), 1650 (teknik) ^[1]	Fleksibel dan dapat menyuplai kebutuhan energi yang tinggi saat musim panas	Menghasilkan banyak limbah beracun saat proses produksi alat
	<i>Concentrating Solar Power (CSP)</i>	2190 ^[1]	Sesuai untuk wilayah yang terdapat sedikit tutupan awan	Hanya sesuai untuk area yang permukaannya stabil dan sedikit kering
PLTA	<i>Run-of-River (RoR)</i>	62 ^[1]	Dapat menyediakan lebih dari 20% kebutuhan tahunan ^[3]	Produksinya tidak dapat dijadwalkan karena tidak memiliki tempat penyimpanan ^[3]
	<i>Reservoir</i>	39 ^[2]	Dapat digunakan sebagai sistem irigasi ^[3]	Bergantung pada topografi untuk membangun sistem ^[3]
	<i>Pump Storage</i>	766 ^[3]	Lebih fleksibel karena dapat memproduksi energi di saat kebutuhan tinggi ^[3]	Lebih mahal daripada reservoir konvensional ^[3]

Sumber: ^[1]Moriarty dan Honnery, 2012 ^[2]Ralph E.H *et al.*, 2007 ^[3]International Renewable Energi Agency, 2012

2.2 Fluktuasi Sumber Energi Terbarukan

Produksi energi oleh CREs bergantung pada variabel cuaca sehingga analisis fluktuasinya merupakan salah satu analisis yang penting untuk menghubungkannya dengan sistem kebutuhan tenaga listrik. Fluktuasi tersebut dapat dianalisis berdasarkan pengaruh perbedaan waktu dan ruang. Analisis dalam skala waktu (*time series analysis*) dari salah satu produksi energi dapat menjelaskan adanya perbedaan pola yang berdasarkan skala waktu seperti harian, mingguan, maupun musiman. Selain itu, analisis dalam skala ruang (*spatial analysis*) dapat berkontribusi pada pembuatan model fluktuasi berdasar pada skala lokal dan regional yang dapat pula digunakan untuk mengestimasi korelasi antar area yang berdekatan. Disamping kedua analisis tersebut, analisis *spatio-temporal* sebagai gabungan keduanya dapat digunakan untuk mengestimasi waktu dan area di saat fluktuasi tersebut terjadi (Astutik *et al.*, 2012, Astutik *et al.*, 2013, and Fytilas *et al.*, 2003).

Dalam sistem PLTA di Eropa, perubahan jumlah produksi selalu terjadi di setiap musim; Rendahnya jumlah debit sungai ketika musim panas (Eropa selatan) atau ketika musim dingin (Eropa utara). Berdasarkan Hannaford *et al* (2011), musim panas merupakan waktu ketika kekeringan sering terjadi dan dapat menyebabkan sumber air bagi PLTA berada di titik terendah dan dapat mengurangi jumlah produksi listrik terutama di Eropa selatan. Kelangkaan air pada musim ini terjadi karena sedikitnya presipitasi di setiap daerah aliran sungai (DAS) hingga mencapai 20% dari jumlah aliran tahunan di setiap DAS. Hal tersebut harus di estimasi karena dapat mempengaruhi jumlah produksi listrik dari PLTA (Gaudard *et al.*, 2014).

Disamping itu, PLTS yang menggunakan PV atau CSP bergantung pada durasi paparan sinar matahari. Produksi energi dari kedua teknologi ini dapat berkurang hingga 50% antara musim panas dan dingin. Variasi energi dari PLTS juga bergantung pada fluktuasi harian radiasi matahari. Apabila hari-hari berawan, produksi energi akan berkurang 1,5% per hari (Kothe *et al.*, 2013). Lokasi pembangunan PLTS juga mempengaruhi jumlah energi yang dihasilkan. Berdasarkan Rowlands *et al* (2014), jaringan PV yang dibangun dengan jarak 0-500 km setiap kumpulan unitnya akan menghasilkan jumlah energi yang berbeda apabila dibandingkan dengan jaringan yang berjarak 800-1000 km. Perbandingan ini dapat dilakukan apabila keduanya berada dalam kondisi lokasi yang sama dengan pengamatan setiap jam dan jumlah radiasi harian yang sama. Jarak optimal antar unit dapat dipertimbangkan dari jenis area (pantai atau pegunungan) dan dari total area PLTS. Akan tetapi, PV dan CSP tidak dapat diaplikasikan di area yang kering karena debu dapat mengganggu lensa pada sistem-sistem

tersebut. Penggunaan 27% PLTS sebagai sumber energi dapat menyuplai 80% kebutuhan energi global pada tahun 2050 (Grossmann *et al.*, 2013).

Untuk produksi yang berasal dari PLTB, kecepatan angin terbesar berada di area yang berada di dekat pantai (seperti di Inggris dan Norwegia yang memiliki kapasitas angin terbesar saat musim dingin) (Nawri *et al.*, 2014). Ukuran turbin kincir angin mempengaruhi produksi PLTB; semakin kecil skala turbin, semakin tinggi variasi angin yang dapat ditangkap oleh sistem (Pazouki *et al.*, 2014). Sebuah kincir angin dapat bergerak apabila turbin tersebut dapat menangkap angin dengan kecepatan minimal 3 m/s, namun apabila terjadi badai turbin harus dimatikan. Penghentian kinerja turbin dapat mengakibatkan turunnya energi produksi secara drastis bukan hanya dari salah satu kincir angin akan tetapi dari seluruh kincir angin yang terdapat di salah satu *wind farm*. Oleh karena itu, dalam pemanfaatan energi dari PLTB, *wind farm* harus dibangun dengan jarak tertentu untuk mencegah berkurangnya produksi energi dalam skala regional (Bossanyi dan King, 2012).

2.3 Fluktuasi Kebutuhan Energi

Pada dasarnya, jumlah potensial energi yang dihasilkan oleh seluruh sumber energi dapat mencukupi seluruh kebutuhan manusia. Akan tetapi, hal tersebut terkendala oleh fluktuasi kebutuhan energi. Oleh karena itu, analisis fluktuasi kebutuhan energi sehari-hari dapat dilakukan melalui analisis fluktuasi produksi energi. Di Eropa, konsumsi energi tertinggi terjadi pada tahun 2005 (lebih tinggi 6% daripada tahun 2000). Denmark, Prancis, dan, Inggris merupakan negara-negara yang menggunakan jumlah energi per jiwa tertinggi dalam sektor transportasi, industri, dan rumah tangga (European Commission, 2014).

Fluktuasi kebutuhan energi terjadi bukan hanya musiman namun juga setiap jam. Kebutuhan energi tertinggi terjadi selama jam aktif (09.00 hingga 16.00). Untuk skala musiman, kebutuhan energi di musim dingin lebih tinggi daripada di musim panas sesuai dengan penggunaan sistem pemanas dan penghangat ruangan yang dipakai di setiap negara (ENTSOE, 2013). Selain itu, harga pembelian energi listrik dan pendapatan dalam faktor sosial-ekonomi juga mempengaruhi penggunaan energi setiap jiwa (Romero-Jordán *et al.*, 2014).

2.4 Aplikasi Sumber Energi Terbarukan sebagai Sumber Energi di Indonesia

Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki tiga sumber energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Tingginya intensitas radiasi matahari harian dapat digunakan sebagai sumber pembangkit listrik bertenaga surya (PLTS). Menurut Veldhuis dan Reinders (2013), potensi energi dari PLTS adalah 37 TWh/tahun atau setara dengan 26% total konsumsi listrik di Indonesia pada tahun 2010. Area yang memiliki intensitas radiasi matahari tertinggi adalah wilayah Indonesia bagian tengah.

Selain itu, pemasangan kincir angin di area pantai dapat meningkatkan potensi produksi energi yang berasal dari kincir angin. Produksi tahunan kincir angin di pinggi pantai Indonesia diperkirakan mencapai 496 MWh/tahun untuk turbin kincir berkapasitas 1 kW (Hiendro *et al.*, 2013).

Sistem pembangkit listrik tenaga air atau PLTA merupakan sistem yang banyak digunakan di Indonesia. Potensial energi yang dapat dihasilkan dari sistem ini mencapai 75.000 MW. Saat ini, terdapat kurang lebih 6000 unit PLTA dengan kapasitas 300 kW hingga 5 MW telah dibangun di Indonesia (Center for Research on Material and Energi, 2002).

Akan tetapi, potensial- potensial tersebut belum digunakan secara maksimal. Potensial energi dari PLTS hanya digunakan sebesar 42,78 MW/tahun, dari PLTB hanya 1,33 MW/tahun, dan dari PLTA hanya 7.059 MW/tahun (Ditjen EBTKE, 2013).

Tabel 2.2 Potensial energi dan kapasitas terpasang di Indonesia

Sumber Energi	Potensial	Kapasitas terpasang
PLTA	75.000 MW	7.059 MW/tahun
PLTS	4,8 kWh/m ² /hari	42,78 MW/tahun
PLTB	3-6 m/s	1,33 MW/tahun

Sumber: Ditjen EBTKE, 2013

2.5 Gambaran Umum Daerah Penelitian

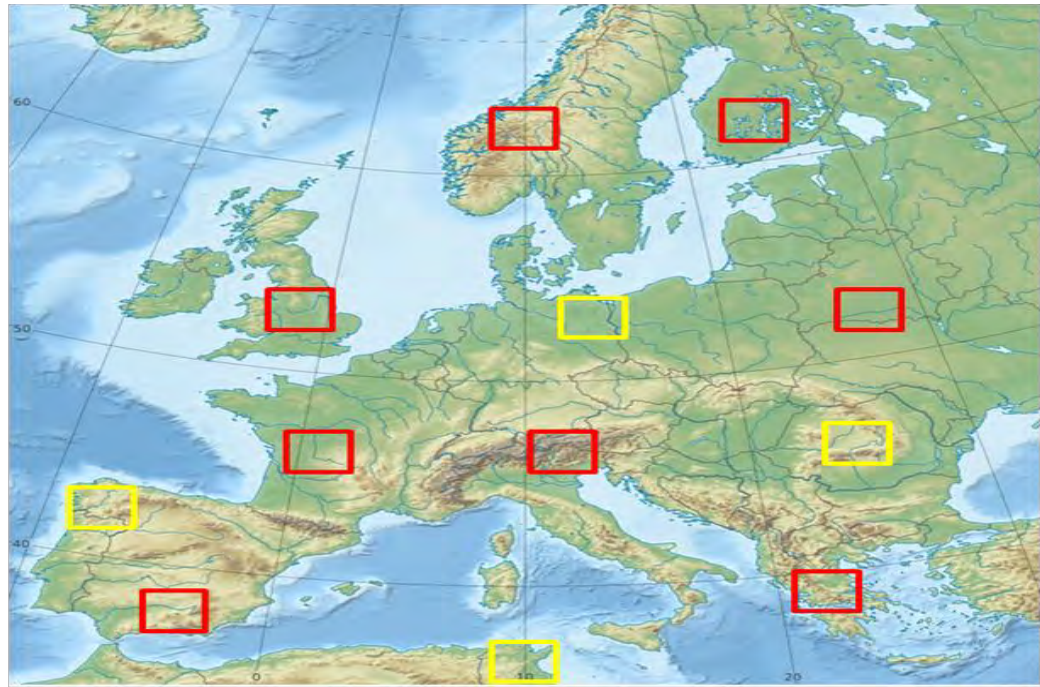
Dalam studi ini, ketiga sumber energi (radiasi matahari, angin, dan air) dievaluasi di 12 negara yang tersebar di benua Eropa (**Error! Reference source not found.**). Pemilihan negara-negara tersebut didasarkan pada perbedaan karakteristik iklim dari kutub (area utara) ke subtropis (area selatan) dan dari area sekitar lautan ke area di daratan. Perbedaan pertama adalah antara iklim kutub ke subtropis. Area utara yang meliputi Norwegia dan Finlandia lebih terpengaruh oleh kondisi iklim kutub, sedangkan area selatan yang meliputi Yunani,

Andalusia (Spanyol Selatan), Italia, dan Tunisia lebih terpengaruh oleh iklim mediterania. Perbedaan pertama ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan fluktuasi temperatur dan intensitas radiasi matahari musiman antara wilayah utara dan selatan dalam produksi dan kebutuhan energi. Di wilayah utara, terdapat perbedaan temperatur yang signifikan antara musim dingin dan musim panas. Akan tetapi, semakin ke selatan, semakin kecil perbedaannya. Wilayah utara atau *Nordic* diwakili oleh Norwegia dan Finlandia karena kedua negara tersebut merupakan wilayah paling utara di daratan Eropa. Wilayah selatan diwakili oleh Yunani, Andalusia, dan Italia karena wilayah tersebut merupakan wilayah paling selatan di Eropa. Selain itu, wilayah selatan atau *Mediterranean* berdekatan dengan Laut Mediterania sehingga perubahan cuaca di laut ini juga akan mempengaruhi wilayah tersebut. Dengan alasan inilah Tunisia yang terletak di wilayah utara Afrika juga diikutsertakan dalam wilayah studi pada perbedaan pertama.

Perbedaan kedua adalah antara area sekitar samudera Atlantik atau *Oceanic* (Prancis Barat, Inggris, dan Galisia, Spanyol Utara) dan Eropa daratan atau *Continental* (Romania dan Belarusia). Perbedaan kedua ini bergantung pada lautan dan daratan di sekelilingnya. Perbedaan kedua ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan fluktuasi sumber energi terutama kecepatan angin dan debit sungai per musimnya antara wilayah yang dikelilingi daratan luas dan wilayah yang berdekatan dengan samudera Atlantik. Inggris dipilih menjadi salah satu wilayah *Oceanic* karena negara ini dikelilingi oleh samudera Atlantik. Sedangkan wilayah Prancis dan Spanyol hanya dipilih wilayah barat Prancis dan utara Spanyol karena hanya pada bagian inilah terdapat pembangkit listrik yang langsung berinteraksi dengan samudera. Wilayah *Continental* hanya diwakili oleh Romania dan Belarusia karena kedua negara tersebut memiliki pembangkit listrik yang dikelilingi daratan yang cukup luas.

Jerman dipilih sebagai wilayah yang terkena pengaruh dari perbedaan pertama dan kedua. Jerman yang berdekatan dengan wilayah selatan Norwegia terpengaruh iklim kutub secara tidak langsung sehingga fluktuasi temperatur musimannya memiliki pola yang hampir sama dengan Norwegia. Wilayah ini juga berbatasan langsung dengan lautan sehingga dapat masuk dalam kategori wilayah *Oceanic*. Akan tetapi, pembangkit listrik di Jerman juga dikelilingi oleh daratan yang luas. Dengan alasan tersebut, Jerman diambil sebagai wilayah peralihan dalam penelitian ini.

Pada Gambar 2.1, terdapat kotak berwarna merah dan kuning. Kotak berwarna merah merupakan delapan wilayah utama yang telah direncanakan untuk diteliti sejak awal penelitian ini dilakukan. Untuk mendukung delapan wilayah tersebut, ditambahkan empat wilayah lainnya.

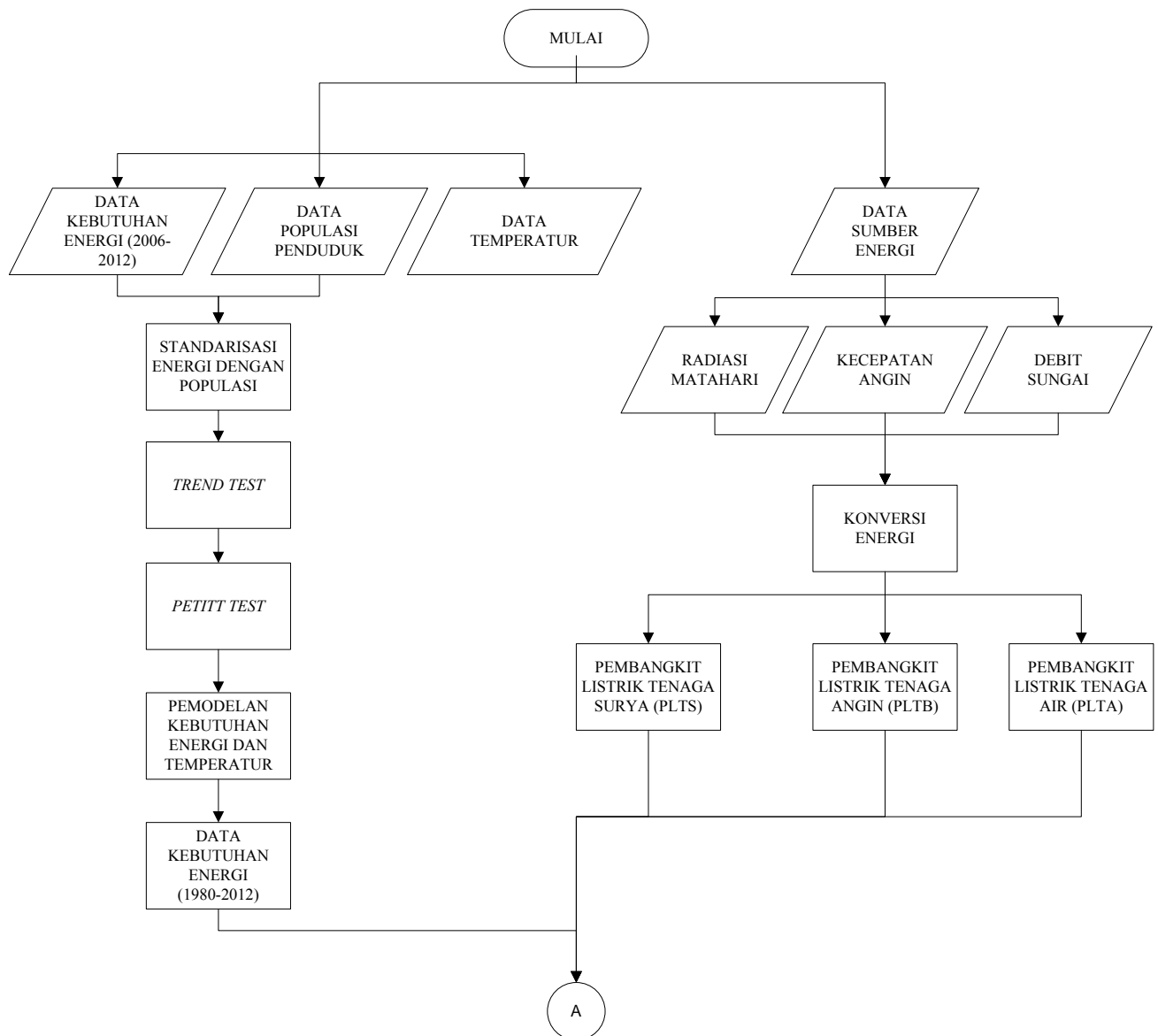


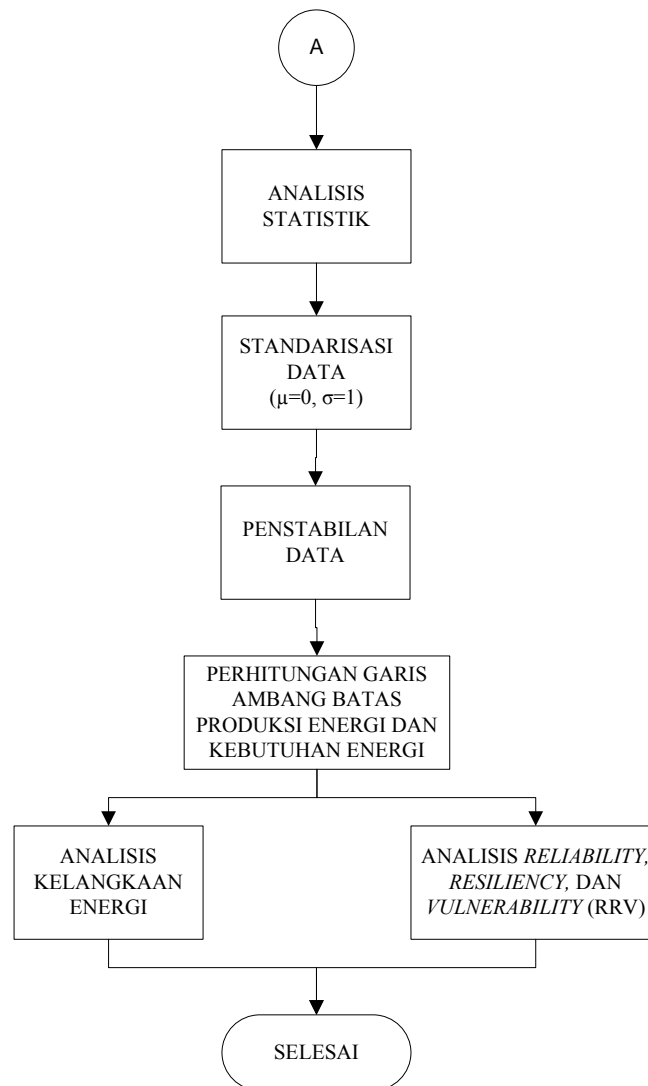
Gambar 2.1 Dua belas negara yang digunakan dalam studi kasus

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan pada sub-bab 1.2, maka terdapat beberapa tahap analisis pada penelitian ini (Gambar 3.1). Langkah-langkah utama dalam penelitian ini meliputi pengumpulan data (primer dan sekunder), analisis data untuk pengambilan kesimpulan dari perumusan masalah yang ada.





Gambar 3.1 Sistematika penelitian

3.1 Pengambilan Data

Proses pertama dalam penelitian ini adalah pengambilan data yang didukung oleh tim riset proyek COMPLEX (*Knowledge Based Climate Mitigation Sistem for a Low Carbon Economy*). Data yang dibutuhkan untuk analisis penelitian ini antara lain:

a. Data primer

Data primer merupakan hasil survey lapangan di 12 negara yang meliputi:

- Ketinggian kincir angin untuk memutuskan ketinggian turbin kincir dimana angin dapat langsung bersentuhan dengan turbin

- Debit sungai untuk mengetahui debit minimum dan maksimum yang dapat diproses dalam PLTA

b. Data sekunder

Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari instansi terkait maupun hasil pemodelan yang telah dilakukan sebelumnya. Data sekunder yang digunakan untuk melengkapi data primer dalam penelitian ini adalah:

- Data kecepatan angin mulai 1980 hingga 2012 yang berasal dari *Weather Research and Forecasting model* (WRF, Vautard *et al.*, 2014) di ketinggian 10 m dari permukaan tanah untuk menghitung produksi energi dari PLTB. Seluruh anemometer di stasiun pengamat pembangkit listrik ini terletak pada ketinggian standar yaitu 10 meter di atas permukaan tanah.
- Temperatur data mulai 1980 hingga 2012 yang didapat dari hasil pemodelan *ECAD weather analysis for European domain* (Haylock *et al.*, 2008) dan data radiasi dari *Weather Research and Forecasting model* (WRF, Vautard *et al.*, 2014) yang digunakan untuk menghitung produksi energi dari PLTS
- Data harian aliran sungai didapat dari Global Runoff Data Center (GRDC) yang digunakan untuk menghitung produksi energi dari PLTA
- Data kebutuhan energi didapat dari ENTSOE (<https://www.entsoe.eu/db-query/country-packages/production-consumption-exchange-package>) mulai 2006 hingga 2012 yang digunakan untuk pemodelan kebutuhan energi. Hasil pemodelan ini akan digunakan untuk menghitung kebutuhan energi pada 1980-2012

3.2 Analisis Data

3.2.1 Konversi Energi

a. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)

Energi yang berasal dari PLTB bergantung pada kecepatan angin v (m/s) di pusat rotor turbin kincir angin. Pada studi ini, ketinggian kincir angin, H (m), diasumsikan 70 m dari permukaan tanah karena pada angin akan menabrak pusat rotor turbin secara langsung dan menggerakkan kincir angin pada ketinggian tersebut. Data kecepatan angin yang dikumpulkan pada tahap pengumpulan data merupakan data kecepatan angin pada ketinggian 10 m dari permukaan tanah. Oleh karena itu, data tersebut dikonversikan menjadi data pada ketinggian 70 m menggunakan persamaan (3.1) (Lu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009).

$$v_{H_{70m}} = v_{H_{10m}} \left(\frac{H_{70m}}{H_{10m}} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

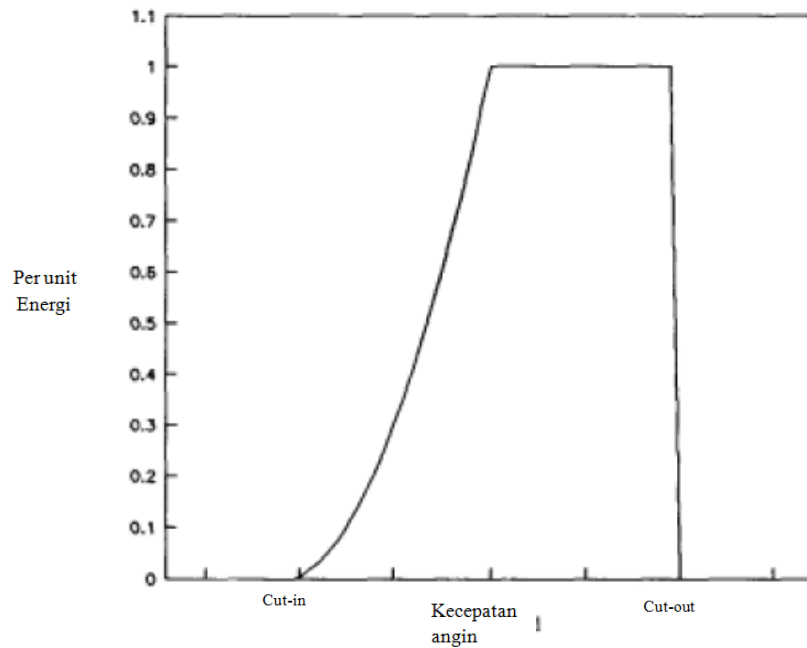
Dimana $v_{H_{70m}}$ merupakan kecepatan angin pada ketinggian 70 m (m/s), H_{70m} merupakan tinggi turbin (m), dan α adalah indeks lingkungan yang berhubungan dengan kondisi sekitar *wind farm* (hutan, lautan, atau pegunungan). Nilai α ditentukan dari Tabel 4.1.

Tabel 3.1 Indeks lingkungan dalam konversi data energi angin

Indeks	Kondisi Lingkungan
100	Laut dan danau
70	Tanah terbuka
50	Sebaran vegetasi tanpa pembatas, sebaran bangunan, bukit kecil yang berjarak 0-3 km
45	Sebaran vegetasi dengan tinggi pembatas 7-8 meter dalam jarak 1200 meter, beberapa kumpulan bangunan
38	Sebaran vegetasi dengan tinggi pembatas 7-8 meter dalam jarak 500 meter, beberapa kumpulan bangunan
30	Sebaran vegetasi dengan tinggi pembatas 7-8 meter dalam jarak 250 meter, beberapa kumpulan bangunan
26	Desa dan kota dengan pembatas 8 meter, hutan yang berjarak 250 meter, dan tanah yang sangat kasar
17	Kota besar atau hutan yang lebat
12	Kota metropolitan atau hutan yang sangat lebat

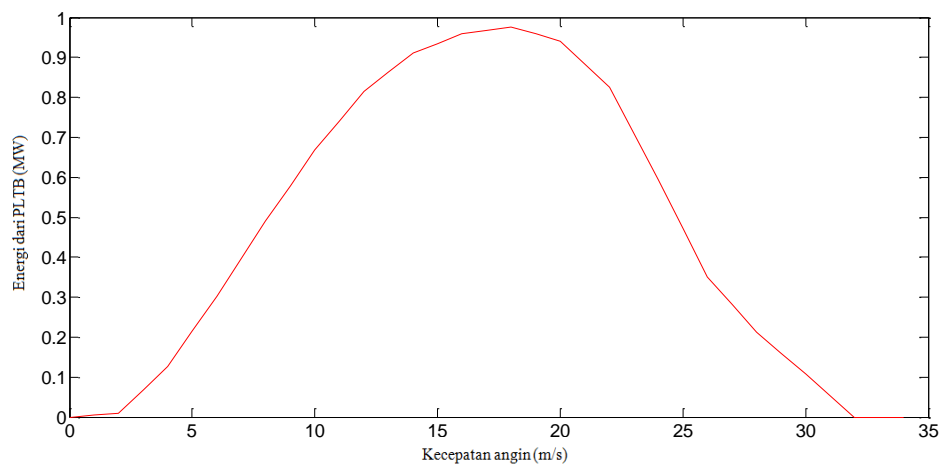
Sumber : Lu *et al.*, 2009 dan Li *et al.*, 2009

Kurva pembentukan energi pada Gambar 3.2 digunakan untuk mengubah data kecepatan angin menjadi energi (Richardson dan McNerney, 1993). Terdapat tiga tahapan kinerja turbin kincir angin sesuai Gambar 3.2. Pertama, angin dengan kecepatan minimum (3 ms^{-1}) akan menggerakkan turbin setelah proses *start-up* dimulai (proses *cut-in*). Kedua, energi yang diproduksi akan meningkat secara linear dengan kecepatan angin. Terakhir, apabila angin terlalu cepat, turbin akan dihentikan secara tiba-tiba dengan alasan keamanan (proses *cut-off*).



Gambar 3.2 Kurva pembentukan energi pada PLTB

Akan tetapi, Gambar 4.1 hanya dapat digunakan pada data kecepatan angin saat itu juga (saat pengambilan data yang dilakukan setiap jam). Sedangkan pada studi ini, data kecepatan angin yang digunakan adalah data setiap tiga jam. Oleh karena itu, kurva tersebut diubah menjadi kurva variasi energi per tiga jam seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Kurva energi dari PLTB per tiga jam

b. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sistem PLTS yang digunakan pada penelitian ini adalah *Photovoltaic panel* (PV). Input data yang dibutuhkan untuk menghitung produksi energi menggunakan persamaan (3.2)

meliputi data radiasi dan temperatur (Perpiñan *et al*, 2007). Berdasarkan persamaan tersebut, meskipun jumlah radiasi matahari merupakan data utama, akan tetapi panel pada sistem dan temperatur ambien juga mempengaruhi produksi energi karena efisiensi produksi dari panel pada sistem PV dapat berkurang apabila temperatur ambien terlalu tinggi (temperatur panel akan linear dengan temperatur ambien).

$$P_{DC}(t) = \left(I_{eff}(t) A_g \left\{ \eta_{g,STC} \left[1 - \mu (T_a(t) - T_{c,STC}) \right] \right\} + I_{eff}(t)^2 A_g \left\{ -\mu_{g,STC} \mu C \right\} \right) \times \mu_{inv} \quad (3.2)$$

Dimana P_{DC} adalah energi yang dihasilkan, A_g adalah luas permukaan sistem PV (m), I_{eff} adalah radiasi efektif dimana radiasi matahari yang secara efektif dapat menyentuh panel PV yang diletakkan dalam sudut tertentu (W/m^2), $\eta_{g,STC}$ adalah efisiensi generator ketika aliran energi berada dalam kondisi standar, μ adalah koefisien temperatur dari panel yang mengindikasikan adanya penurunan produksi energi beberapa persen dalam setiap kenaikan suhu di atas $25^\circ C$ ($\%/^\circ C$), C adalah parameter yang lain yang didasarkan pada metode *Nominal Operation Cell Temperature* (NOCT), T_a adalah temperatur ambien, dan $T_{c,STC}$ adalah temperatur panel pada kondisi standar. Kondisi standar merupakan kondisi dimana panel pada sistem telah diuji untuk memproduksi energi dari $1000 W/m^2$ radiasi, $25^\circ C$ temperatur panel, dan 1,5 indeks massa udara. Dari persamaan (1.2), energi dapat dihitung ketika efisiensi inverter sistem (μ_{inv}) berada dalam angka 0.21.

Parameter C dapat dihitung menggunakan persamaan 4.3 dimana $T_{c,NOCT}$, $T_{a,NOCT}$, dan I_{NOCT} merupakan temperatur panel dan udara serta radiasi matahari dalam kondisi NOCT (radiasi yang dapat ditangkap permukaan panel adalah $800 W/m^2$, temperatur udara ambien adalah $20^\circ C$, dan kecepatan anginnya adalah $1 m/s$). Parameter $\eta_{c,STC}$, $T_{c,NOCT}$, dan μ merupakan parameter teknis yang telah disediakan oleh pihak pabrik pembuat panel.

$$C = \frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{I_{NOCT}} \quad (3.3)$$

c. Konversi Energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

PLTA yang digunakan adalah *Run of River* (RoR) dengan mempertimbangkan kondisi kritis dimana tidak terdapat tempat penampungan dan produksi tidak dapat dikontrol karena sistem ini akan langsung mengubah aliran sungai menjadi energi). Data harian aliran sungai didapat dari *Global Runoff Data Center* (GRDC).

Pada penelitian ini, konversi energi diperoleh dari kondisi eksisting setiap unit pembangkit listrik di setiap wilayah. Dalam kondisi eksisting tersebut, dapat langsung

diketahui jumlah energi yang dapat diproduksi berdasarkan debit sungai pada hari tersebut. Debit sungai dalam kasus RoR dibatasi oleh Q_{\min} dan Q_{\max} yang berhubungan dengan batas minimum debit sungai yang dapat digunakan dan kapasitas maksimum PLTA (Singh dan Chandra, 2010). Q_{\min} dan Q_{\max} dihitung dari persentil ke-10 dan ke-80 dari seluruh data debit sungai.

3.2.2 Pemodelan Kebutuhan Energi

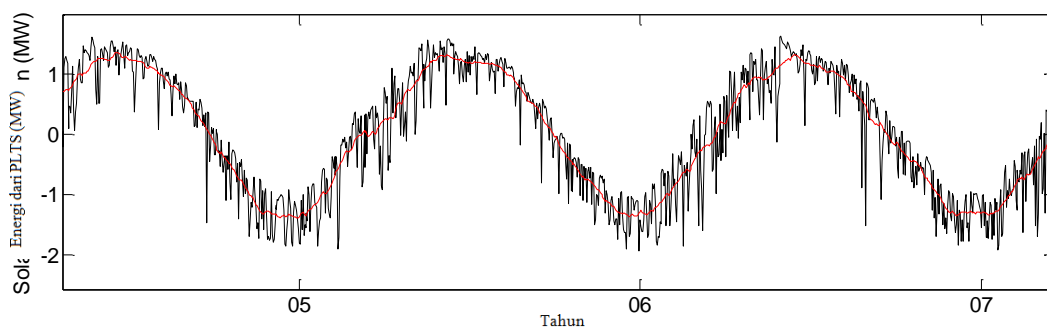
Karena seluruh analisis kebutuhan energi hanya dikaitkan dengan variabel meteorologi, maka variabel lain seperti pertumbuhan penduduk, permasalahan sosial-ekonomi, dan perbedaan ketinggian wilayah harus dihilangkan. Contohnya, adanya perbedaan kebutuhan energi yang disebabkan oleh krisis ekonomi tahun 2008. Variabel independen atau prediktor dalam model ini adalah temperatur karena temperatur merupakan variabel meteorologi yang mudah dilihat perubahannya terhadap kebutuhan energi. Variabel dependen atau variabel konsekuen dalam model ini adalah kebutuhan energi.

Pada studi ini, kedua belas negara memiliki ketinggian wilayah di atas permukaan laut yang berbeda-beda. Sehingga data temperatur yang digunakan dalam model ini adalah data temperatur yang diasumsikan bahwa seluruh negara berada dalam ketinggian yang sama (menggunakan rata-rata ketinggian dari 12 negara). Untuk menghilangkan variabel non-meteorologi, data kebutuhan energi distandarisasi dengan cara membaginya dengan populasi penduduk tahunan dan mencari posisi dimana terdapat perbedaan nilai yang signifikan dari hari ke hari (*shift change*).

Setelah seluruh pengaruh non-meteorologi telah dihilangkan dari data kebutuhan energi, dilakukan regresi linear pada setiap kurva di setiap wilayah apabila nilai R^2 regresi linear tersebut di atas 0,7; maka regresi tersebut dapat dikatakan sebagai model kebutuhan energi untuk setiap wilayah. Selanjutnya, karena model kebutuhan energi ini digunakan sebagai metode utama dalam menghitung kebutuhan energi 1980-2012, maka seluruh wilayah studi diasumsikan memiliki model yang sama dari panjang serial data yang berbeda di setiap wilayah. Oleh karena itu, model kebutuhan energi yang digunakan adalah hasil rata-rata konstantafungsi regresi linear di setiap wilayah.

3.2.3 Perhitungan Ambang Batas Produksi Energi dan Kebutuhan Energi

Serial data sumber energi dan kebutuhan energi harian yang telah diperoleh kemudian distabilkan dengan cara pengambilan rata-rata per 30 hari dari serial data (*30 days moving average*). Contohnya, data pada 1 Januari 2006 dihitung dari rata-rata nilai pada tanggal 17 Desember 2005 hingga 16 Januari 2006, data pada 2 Januari 2006 dihitung dari tanggal 18 Desember 2005 hingga 17 Januari 2006, dan seterusnya. Dari perhitungan tersebut, serial data yang diolah menjadi lebih stabil dibanding sebelumnya. Selain itu, untuk membuat seluruh serial data dapat dibandingkan (mempunyai *range* yang sama), maka seluruh serial data distandarisasi dengan cara membaginya dengan rata-rata dan variansnya sehingga rata-rata dan variasi data menjadi 1 dan 0. Serial data ini akan digunakan dalam seluruh analisis selanjutnya. Pada Gambar 3.4, terdapat contoh perbedaan data harian yang telah distandarisasi (grafik hitam) dan data yang telah distabilkan (grafik merah). Pemilihan metode ini bertujuan untuk mengurangi variasi data harian yang cukup tinggi.



Gambar 3.4 Contoh data harian produksi energi dari PLTS di Norwegia

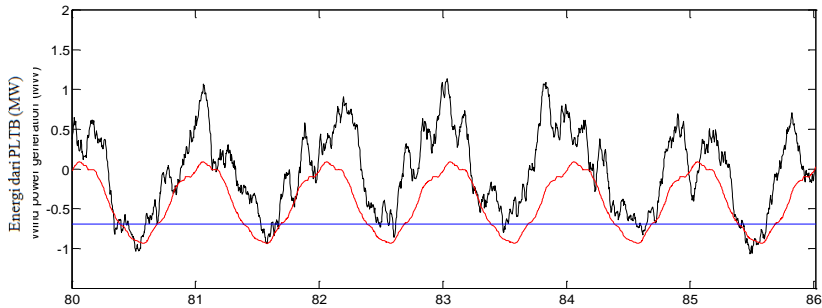
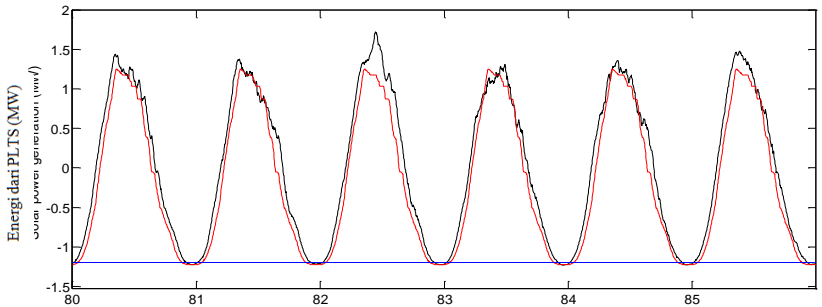
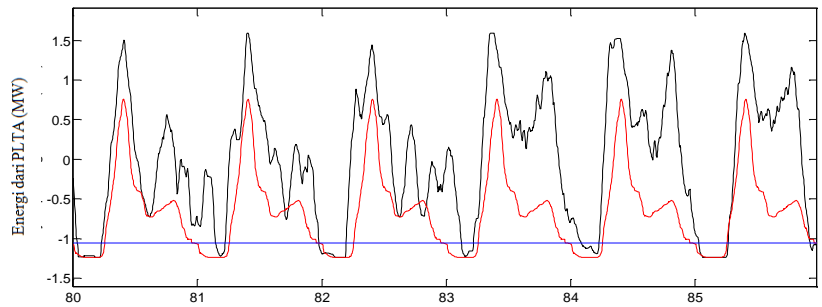
Dengan menggunakan serial data yang telah stabil tersebut, garis ambang batas sebagai penentu periode terjadinya kelangkaan energi diperoleh dari perhitungan persentil ke-sepuluh. Apabila suatu nilai produksi energi berada di bawah garis ambang batas, maka dapat dikatakan bahwa terjadi kelangkaan energi pada periode tersebut. Terdapat dua jenis perhitungan persentil ke-sepuluh dalam penelitian ini:

- Pengambilan persentil ke-sepuluh dari seluruh serial data (ambang batas konstan). Sehingga garis ambang batas berbentuk garis linear yang konstan terhadap waktu
- Pengambilan persentil ke-sepuluh yang dihitung pada setiap 30 hari (*moving window of 30 days*) dengan cara mengambil 15 hari sebelum dan sesudah hari yang diinginkan ($d(t)$). Metode ini telah dilakukan oleh Hannaford *et al.* (2011) dalam konteks analisis kekeringan. Garis ambang batas metode kedua ini disebut ambang batas harian.

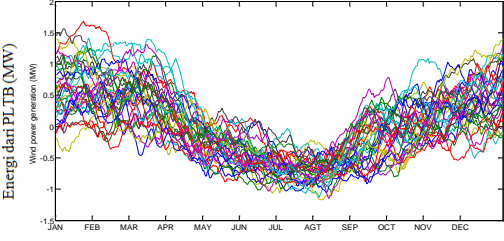
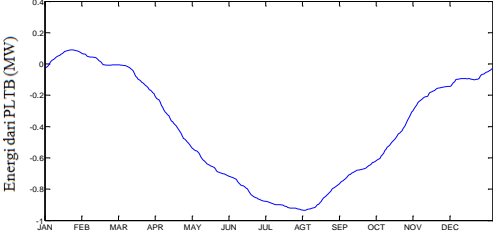
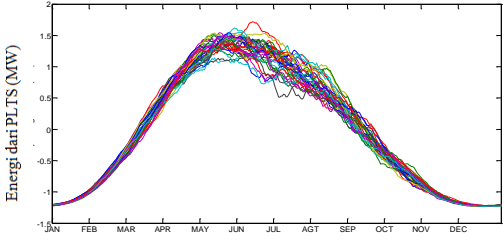
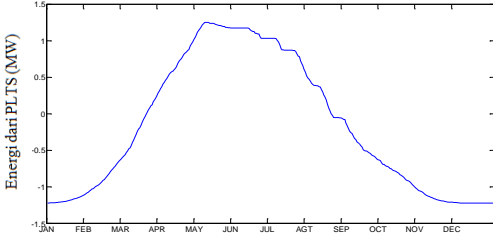
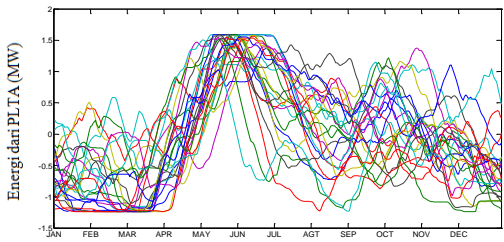
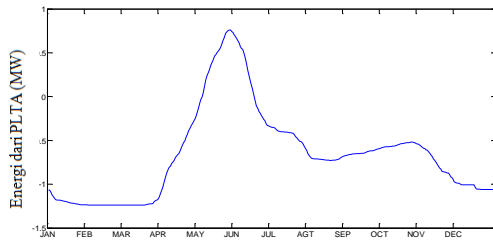
Pada analisis kelebihan kebutuhan energi, ambang batas yang digunakan adalah persentil kesembilan puluh dan kebutuhan energi dikatakan berlebih apabila suatu nilai kebutuhan energi berada di atas garis ambang batas.

Contoh garis ambang batas produksi energi di Norwegia ditunjukkan pada Tabel 3.2. Grafik hitam merupakan data observasi, grafik merah adalah garis ambang batas harian, dan grafik biru merupakan garis ambang batas konstan. Pada tabel tersebut, terdapat data produksi energi dari PLTB, PLTS, dan PLTA yang telah distabilkan mulai 1980 hingga 1985. Dari seluruh serial data, dibentuk dua garis ambang batas yaitu konstan dan harian. Detail pembentukan garis ambang batas harian terdapat pada Tabel. 3.2.

Tabel 3.2 Produksi energi dari setiap sumber di Norwegia beserta garis ambang batasnya

Sumber energi	Data dan ambang batas
PLTB	
PLTS	
PLTA	

Tabel 3.3 Pembentukan garis ambang batas harian di Norwegia pada setiap sumber energi

Sumber energi	33 grafik dari data harian (diplotkan per tahun) selama 33 tahun (1980-2012)	Hasil perhitungan garis ambang batas yang diperoleh dari pengambilan persentil ke-sepuluh dari 33 grafik
PLTA		
PLTS		
PLTA		

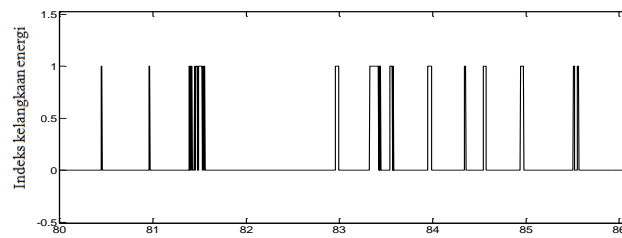
Berdasarkan Tabel 3.2, nilai ambang batas untuk tanggal 1 Januari 2006 diperoleh dari pengambilan persentil ke-sepuluh dari serial data mulai 17 Desember hingga 16 Januari yang telah diurutkan. Proses perhitungan ini menghasilkan garis ambang batas dalam satu tahun (tanpa data dari setiap tanggal 29 Februari di tahun kabisat). Untuk memperoleh garis ambang batas harian selama 33 tahun, garis tersebut diulang selama 33 kali. Tujuan penggunaan garis ambang batas konstan adalah untuk menekankan pada periode musiman ketika energi produksi yang rendah terjadi. Sedangkan penggunaan garis ambang batas harian bertujuan untuk mendeteksi adanya periode ketika produksi energi lebih rendah dari jumlah energi yang biasanya dapat diproduksi.

Dari kedua garis ambang batas tersebut dapat diketahui indeks kelangkaan energi berdasarkan metode dari Hannaford *et al.* (2011). Indeks ini menggunakan bilangan biner

dimana 0 mengindikasikan bahwa kelangkaan energi tidak terjadi dan 1 mengindikasikan bahwa kelangkaan energi terjadi pada waktu tersebut.

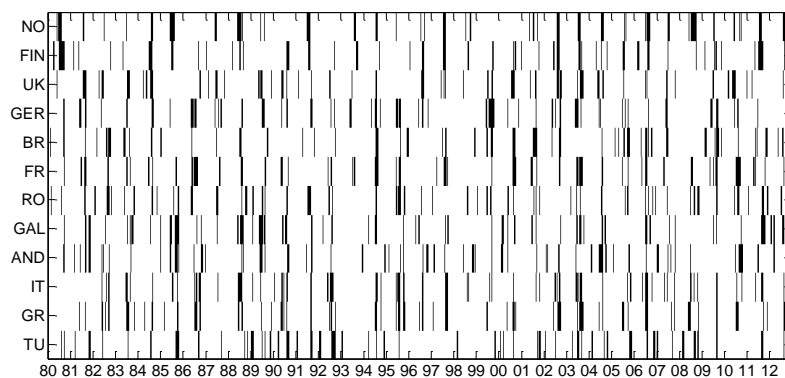
$$\begin{aligned} bin(t) &= 1 & \text{jika} & \quad energi(t) \leq garis(t) \\ bin(t) &= 0 & \text{jika} & \quad energi(t) > garis(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Contoh indeks kelangkaan energi pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tidak ada kelangkaan energi pada tahun 1982 karena grafik menunjukkan angka 0 yang berarti bahwa produksi energi pada periode tersebut selalu di atas garis ambang batas harian.



Gambar 3.5 Contoh indeks kelangkaan energi dari PLTS di Norwegia pada tahun 1980-1985

Indeks ini juga digunakan dalam hal gabungan seluruh sumber energi untuk mengetahui waktu ketika kelangkaan salah satu energi terjadi dan energi lain dapat menggantikannya (kombinasi sumber energi di setiap negara) dan mengetahui periode ketika terjadi kelangkaan energi secara bersamaan di kedua belas wilayah. Tahap tersebut dilakukan dengan metode *mesh plot* yang diurutkan dari wilayah paling utara ke wilayah paling selatan. Pada metode ini, hanya terdapat warna hitam dan putih. Warna hitam menandakan terjadinya kelangkaan energi dan sebaliknya (Gambar 3.6).



3.6 Contoh metode mesh plot

Dari kombinasi energi tersebut, analisis fluktuasi secara *spatio-temporal* antara kelangkaan energi dan kebutuhan energi yang berlebih dapat dilakukan. Dalam analisis

temporal (berdasarkan data harian atau musism) di suatu wilayah, durasi kelangkaan energi selama 33 tahun dapat diketahui. Sedangkan dalam analisis spasial (berdasarkan data dari wilayah), kelangkaan energi yang terjadi secara bersamaan di beberapa wilayah dapat dianalisis.

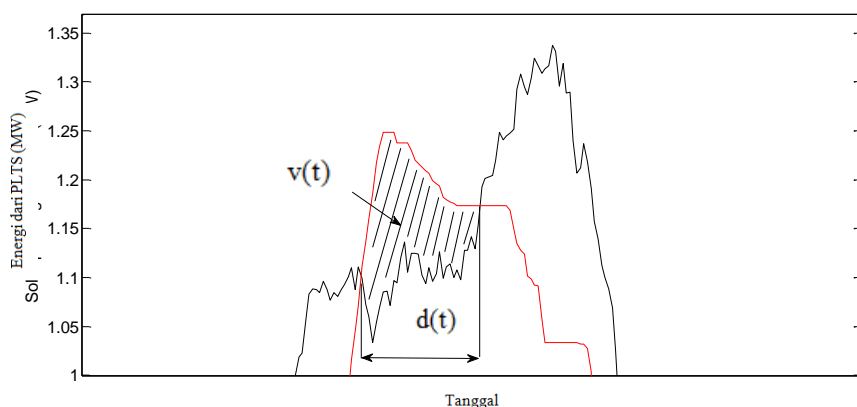
3.2.4 Analisis *Reliability*, *Resiliency*, dan *Vulnerability* (RRV)

Dalam analisis intensitas dan durasi kelangkaan energi, indeks ini dapat digunakan untuk perhitungan RRV (Hashimoto *et al.*, 1982). *Reliability* atau ketahanan suatu serial data terhadap garis ambang batas merupakan probabilitas dari energi produksi lebih dari ambang batas.

$$rel = prob[X_t > T] \quad (3.4)$$

Dimana X_t adalah energi produksi dan T adalah garis ambang batas.

Sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 3.7, *resiliency* dan *vulnerability* digunakan untuk mengetahui karakter periode ketika energi yang diproduksi kurang dari garis ambang batas. Grafik merah adalah garis ambang batas harian dan grafik hitam adalah serial data. Ketika posisi grafik warna hitam di bawah grafik warna merah, produksi energi kurang dari yang diinginkan (terjadi kelangkaan energi). *Resiliency* atau kemampuan suatu serial data untuk kembali normal setelah terjadi kelangkaan energi merupakan pengukuran durasi terjadinya kelangkaan. *Vulnerability* atau kerentanan serial data terhadap garis ambang batas merupakan pengukuran intensitas suatu kelangkaan energi.



Gambar 3.7 Contoh periode terjadinya kelangkaan energi pada PLTS di Belarusia

Terdapat dua cara perhitungan *resiliency*; Menggunakan nilai maksimum dan rata-rata dari durasi periode kelangkaan energi di seluruh serial data sesuai dengan rumus berikut:

$$res_1 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M d(t) \right\}^{-1} \quad (3.5)$$

$$res_2 = \left\{ \max \{d(t)\} \right\}^{-1} \quad (3.6)$$

Dimana M adalah total periode terjadinya kelangkaan energi dan $d(t)$ adalah durasi kelangkaan energi harian.

Tanda invers pada rumus (4.6) dan (4.7) menunjukkan bahwa nilai *resiliency* akan rendah apabila rata-rata durasi kelangkaan energi lama. Ketika durasi berada pada nilai maksimum, hal tersebut berarti bahwa produksi energi pada suatu wilayah sulit untuk kembali normal setelah kelangkaan energi terjadi.

Intensitas kelangkaan energi pada Gambar 3.7 dapat dihitung menggunakan rumus *vulnerability* sebagai berikut:

$$vul_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(t) \quad (3.7)$$

$$vul_2 = \max \{v(t)\} \quad (3.8)$$

Dimana $v(t)$ adalah defisit energi harian.

Tujuan perhitungan menggunakan nilai maksimum adalah untuk mengetahui intensitas kelangkaan tertinggi. Sedangkan perhitungan menggunakan nilai rata-rata bertujuan untuk mengetahui seberapa lama kelangkaan biasa terjadi dalam 33 tahun. (Moy *et al.*, 1986 dan Kjeldsen dan Rosbjerg, 2004).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

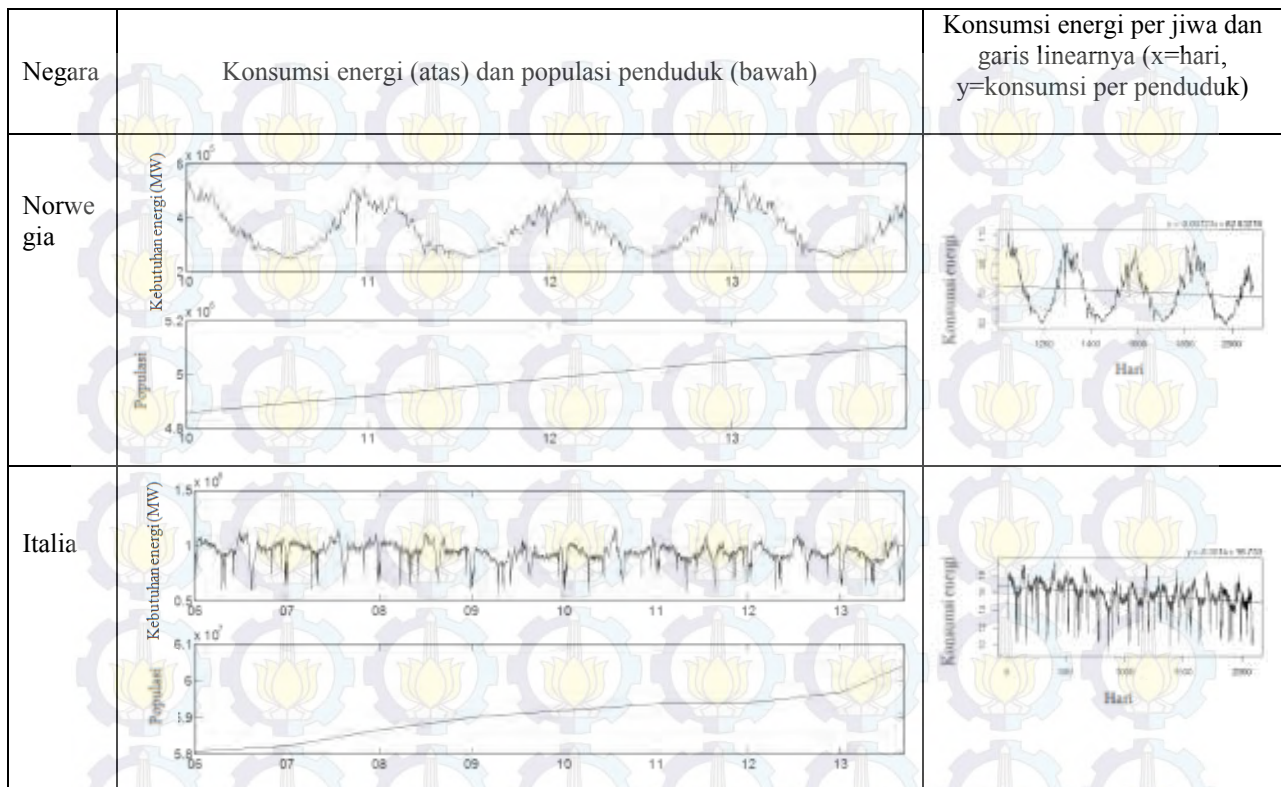
4.1 Pemodelan Kebutuhan Energi

Pada penelitian ini, kebutuhan energi yang dianalisis hanya berdasar pada efek meteorologi. Oleh karena itu, seluruh pengaruh lain seperti pertumbuhan penduduk dan social budaya telah dihilangkan. Pada Tabel 4.1, terdapat contoh kebutuhan energi di Prancis, Norwegia, dan Italia. Untuk membuktikan bahwa seluruh serial data memiliki *trend* atau kecenderungan berubah terhadap variabel waktu, pembentukan garis lurus dari regresi linear dilakukan. Variabel independen dalam regresi linear ini adalah waktu observasi harian (tanpa tanggal kabisat atau data setiap 29 Februari dihapus) dan variabel dependennya adalah data kebutuhan energi yang telah dibagi dengan populasi penduduk. Garis linear pada setiap negara tidak selalu sama. Contohnya, di Prancis, garis linear menunjukkan bahwa kebutuhan energi relatif konstan setiap tahun, namun garis linear pada data kebutuhan energi di Italia menunjukkan adanya penurunan konsumsi energi. Penurunan konsumsi ini dapat disebabkan oleh adanya krisis ekonomi yang dapat menyebabkan adanya perbedaan rata-rata data sebelum dan sesudah adanya krisis (*shift change*).

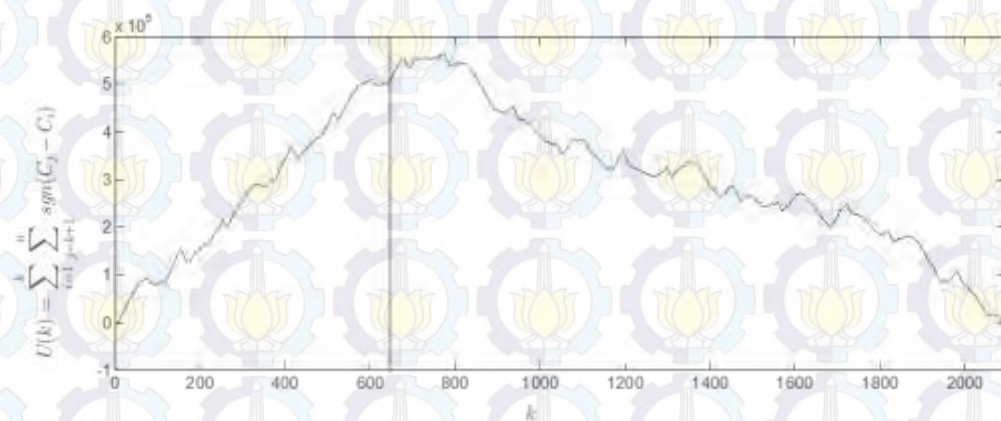
Dalam Tabel 4.1 dan 4.2, diambil contoh tahapan pemodelan hanya di tiga negara yaitu Prancis, Norwegia, dan Italia. Prancis mewakili wilayah *Oceanic*, Norwegia mewakili wilayah *Nordic*, dan Italia mewakili wilayah *Mediterranean*.

Tabel 4.1 Penghapusan pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap kebutuhan energi

Negara	Konsumsi energi (atas) dan populasi penduduk (bawah)	Konsumsi energi per jiwa dan garis linearnya (x=hari, y=konsumsi per penduduk)
Prancis		



Untuk mengidentifikasi periode ketika terjadi perubahan signifikan pada jumlah konsumsi energi dimulai, *Pettitt test* dapat digunakan (Pettitt, 1979). Tujuan dari tes ini adalah menghapus perbedaan rata-rata sebelum dan sesudah perubahan signifikan tersebut. Hasil dari *Pettitt test* di Italia menunjukkan bahwa terdapat perbedaan rata-rata data pada hari ke-774 (17 Desember 2008) (Gambar 4.1). Hal ini dapat disebabkan oleh krisis ekonomi yang mulai terjadi pada tahun 2008.

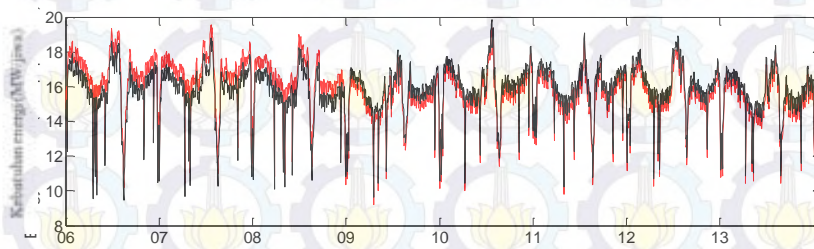


Gambar 4.1 Hasil *Pettitt test* di Italia

Setelah tanggal tepat ketika terjadi pergeseran rata-rata telah diketahui, data kebutuhan energi hasil observasi dihitung dengan tujuan untuk menyamakan rata-rata seluruh serial data menggunakan persamaan (4.1).

$$C(d_{side}) = [C_{ENTSOE}(d_{side}) - a_{Trend,side} \times d_{side}] \times \frac{\mu_{C_{ENTSOE,side}}}{\mu_{C_{ENTSOE}}} \quad (4.1)$$

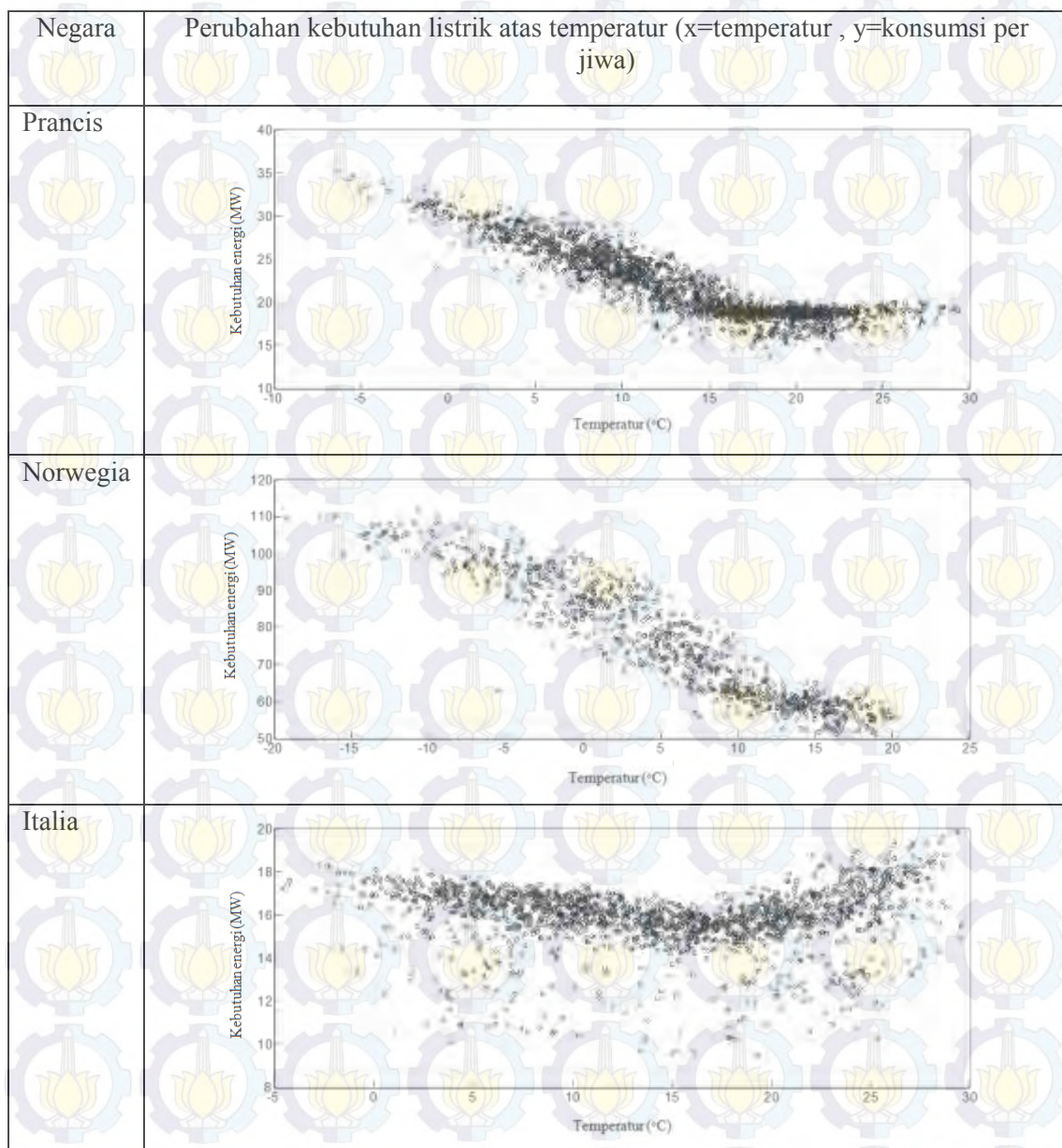
Dimana *side* adalah bagian sebelum atau sesudah pergeseran rata-rata terjadi, *d* adalah hari sebelum atau sesudah pergeseran, μ adalah rata-rata, *C* adalah data kebutuhan energi, dan $a_{Trend,side}$ adalah kemiringan atau *slope* setiap sisi sebelum dan sesudah pergeseran rata-rata terjadi pada data observasi. Hasil perhitungan data kebutuhan energi yang telah dikoreksi menggunakan terdapat pada Gambar 4.2. Grafik hitam merupakan data observasi dan grafik merah merupakan data yang telah dikoreksi.



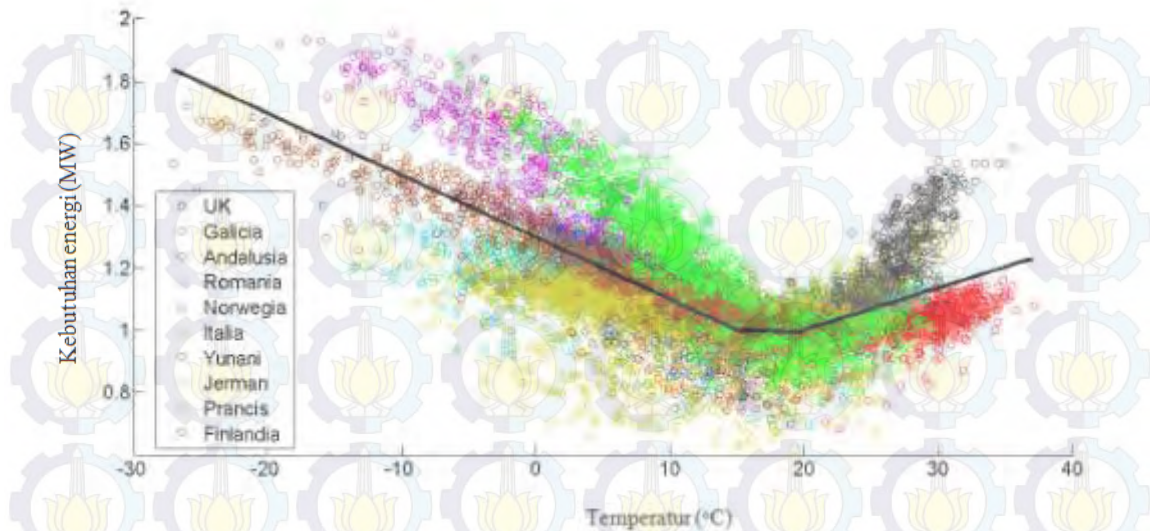
Gambar 4.2 Data kebutuhan energi yang telah di koreksi

Langkah selanjutnya adalah membentuk grafik kebutuhan energi (variabel independen) dan temperatur (variabel dependen) sebagai pengaruh utama fluktuasi kebutuhan energi dari segi meteorologi. (Tabel 4.2). Pada penelitian ini, temperatur yang digunakan bukan temperatur observasi di setiap wilayah, melainkan temperatur observasi yang telah disetarakan di seluruh wilayah pada nol meter diatas permukaan laut. Hal ini bertujuan untuk memperoleh model kebutuhan energi yang sama di seluruh wilayah studi tanpa terpengaruh oleh perbedaan ketinggian stasiun pengamat.

Tabel 4.2 Grafik kebutuhan energi berdasarkan perubahan temperatur



Hasil permodelan kebutuhan energi memperlihatkan bahwa terdapat keterkaitan kuat antara kebutuhan energi dan temperatur lingkungan di Eropa. Konsumsi energi menurun saat temperatur kurang dari 15°C dan meningkat saat temperatur diatas 20°C. Sedangkan konsumsi energi cenderung konstan pada suhu 15-20°C (Gambar 5.3). Untuk mendapat kurva yang dapat dibandingkan antar negara, standarisasi kedua telah dilakukan dengan membagi kebutuhan energi dengan nilai konstan di setiap negara saat suhu berada pada 15-20°C.



Gambar 4.3 Grafik hubungan kebutuhan energi dan suhu di setiap negara

Model kebutuhan energi pada Gambar 4.3 dihasilkan dari perhitungan rata-rata kemiringan garis linear pada setiap negara (Tabel 4.3). Hal tersebut disebabkan oleh dua alasan. Pertama, kepekaan terhadap perubahan temperatur berbeda-beda di setiap negara. Contohnya, kemiringan garis linear di Prancis lebih curam daripada di Italia. Perbedaan tersebut dapat mengindikasikan bahwa terdapat beberapa tipe penggunaan listrik di Eropa: semakin curam kemiringan garisnya, semakin tinggi konsumsi listriknya baik untuk sistem pemanas maupun pendingin. Kedua, panjang serial data di 12 negara tidak sama. Serial data di Prancis, Jerman, Yunani, Spanyol, dan Italy dimulai pada 1 Januari 2006, sedangkan serial data di Finlandia, Norwegia, dan Inggris dimulai tahun 2010. Dari kedua alasan tersebut, model kebutuhan energi yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$d(t) = \begin{cases} -0.02T(t) + 1.31 & T < 15^{\circ}\text{C} \\ 1 & 15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C} \\ 0.01T(t) + 0.79 & T > 20^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.2)$$

Dimana d adalah kebutuhan energi dan T adalah temperatur. Data kebutuhan energi tahun 1980-2012 yang digunakan pada seluruh analisis selanjutnya didasarkan pada permodelan ini.

Tabel 4.3 Fungsi regresi linear di setiap wilayah

Negara	Model 1		Model 2		Model 3	
	Fungsi Regresi	R ²	Fungsi Regresi	R ²	Fungsi Regresi	R ²
Andalusia	$Y = -0,0236x + 1,3540$	0,6942	$Y = 1,045$	0,8184	$Y = 0,0040x + 0,9200$	0,8433
Inggris	$Y = -0,0216x + 1,3240$	0,7439	$Y = 0,951$	0,6913	$Y = 0,0113x + 0,7740$	0,6763
Finlandia	$Y = -0,0187x + 1,2805$	0,8891	$Y = 1,066$	0,9493	$Y = 0,0028x + 0,9440$	0,8377
Prancis	$Y = -0,0452x + 1,6780$	0,7351	$Y = 0,995$	0,7542	$Y = 0,0034x + 0,932$	0,8020
Galisia	$Y = -0,0187x + 1,2805$	0,6895	$Y = 1,015$	0,7652	$Y = 0,0123x + 0,7540$	0,8297
Jerman	$Y = -0,0085x + 1,1275$	0,7042	$Y = 1,000$	0,6853	$Y = 0,0022x + 0,9560$	0,6942
Yunani	$Y = -0,0203x + 1,3045$	0,7344	$Y = 1,064$	0,7199	$Y = 0,0344x + 0,3120$	0,7328
Italia	$Y = -0,0064x + 1,0960$	0,6938	$Y = 1,052$	0,7253	$Y = 0,0161x + 0,6780$	0,8033
Norwegia	$Y = -0,0332x + 1,4980$	0,8509	$Y = 0,961$	0,7504	$Y = 0,00989x + 0,8022$	0,7497
Romania	$Y = -0,0131x + 1,1965$	0,7215	$Y = 0,936$	0,7431	$Y = 0,01000x + 0,8000$	0,9319

Cara pemodelan ini dapat pula digunakan di Indonesia dengan menganggap setiap negara setara dengan provinsi. Berdasarkan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi atau BPPT (2014), BPPT telah memodelkan kebutuhan energi yang didasarkan pada pertumbuhan penduduk dan rasio elektrifikasi. Model tersebut digunakan untuk proyeksi kebutuhan energi tahun 2035 yang hanya didasarkan dari data kebutuhan energi pada tahun 2012 dan proyeksi pertumbuhan penduduk. Hal tersebut berbeda dengan dasar pemodelan pada penelitian ini yang hanya didasarkan pada data kebutuhan energi dan temperatur untuk mengetahui karakteristik penggunaan energi di setiap wilayah studi. Perbedaan konsumsi energi di provinsi yang terletak di dekat pantai akan berbeda dengan yang terletak di pegunungan

(bergantung pada suhu rata-rata harian di setiap provinsi). Pemodelan ini membutuhkan data historis kebutuhan energi dan temperatur harian minimal lima tahun.

4.2 Analisis Statistik

Seluruh data produksi dan kebutuhan energi yang belum distandarisasi ($\mu=0$ dan $\sigma=1$), dianalisis menggunakan statistika dasar untuk mengetahui karakteristiknya. Statistika dasar pada penelitian ini meliputi perhitungan dan grafik rata-rata dan koefisien korelasi. Grafik rata-rata diperoleh dari perhitungan data antar tahun (*average of interannual cycle*) yang dihitung dari perhitungan rata-rata harian selama 33 tahun (Gambar 4.4). Contohnya, rata-rata produksi energi dari PLTA pada setiap tanggal 1 Januari di 33 tahun dihitung untuk memperoleh data rata-rata produksi pada tanggal 1 Januari. Cara tersebut dilakukan hingga memperoleh data rata-rata produksi pada tanggal 31 Desember. Selain itu, perhitungan persentil ke-5 dan ke-95 ditambahkan pada grafik ini untuk mengetahui sebaran data.

Berdasarkan Gambar 4.4, energi dari PLTB di area yang berada di dekat Samudera Atlantik memiliki variasi data yang tinggi dan variasi musimannya terlihat lebih jelas. Energi dari PLTA juga menunjukkan sedikit variasi musiman, tetapi berbeda-beda di setiap wilayah. PLTA di wilayah Eropa utara dan timur, produksi energi maksimum terjadi pada musim semi ketika es mulai mencair. Sedangkan di wilayah lain, produksi tertinggi adalah di musim salju dengan variasi tahunan yang cukup tinggi.

Produksi energi dari PLTS di seluruh wilayah memiliki variasi musiman yang tinggi sesuai dengan fluktuasi durasi matahari. Di wilayah selatan, produksi energi ini lebih tinggi, namun tidak berlaku untuk produksi energi dari PLTB dan PLTA (lihat nilai rata-rata pada Tabel 4.5). Variasi data dihitung untuk mengetahui sebaran data. Nilai variasi data pada energi dari PLTB adalah yang terkecil. Hal tersebut berarti bahwa data tidak terlalu tersebar nilainya di seluruh serial data dan variasi musimannya tidak terlalu terlihat. Nilai variasi data yang tidak terlalu tinggi ini juga terlihat pada data PLTA. Produksi energi dari PLTA di Norwegia, Finlandia, Belarusia, dan Rumania meningkat di awal musim semi karena salju yang mulai meleleh, namun produksi ini menurun ketika salju mulai terakumulasi di awal musim dingin. Sedangkan produksi PLTA di Prancis, Jerman, dan Inggris tidak bergantung pada akumulasi salju seperti keempat negara lainnya, sehingga tidak ada peningkatan produksi energi yang cukup signifikan di setiap tahunnya. Produksi energi di ketiga negara tersebut menurun saat musim panas (bergantung pada tingkat presipitasi). Berdasarkan kedua kasus ini, terdapat dua jenis tipe produksi energi dari PLTA di Eropa yaitu berdasarkan faktor

akumulasi salju dan tingkat presipitasi. Nilai variasi data yang tertinggi terdapat pada produksi energi dari PLTS. Hal tersebut membuktikan bahwa produksi energi dari sistem ini meningkat di musim panas ketika jumlah radiasi matahari mencapai angka tertinggi.

Terdapat empat kotak pada Gambar 4.4 dengan urutan energi dari PLTA di kiri atas, PLTS di kanan atas, PLTB di kanan bawah, dan kebutuhan energi di kiri bawah. Garis hitam adalah rata-rata harian data dan garis putus-putus adalah persentil ke-5 dan ke-95. Kotak kosong pada gambar tersebut disebabkan oleh tidak tersedianya informasi tentang produksi energi dari PLTA di Spanyol (Galisia dan Andalusia), Italia, Tunisia, dan Yunani. Grafik kebutuhan energi di Eropa utara dan selatan terlihat berbeda berdasarkan sistem pendingin ruangan yang dipakai di setiap negara. Di Eropa selatan seperti Yunani dan Itali, kebutuhan energinya tinggi di musim panas karena penduduk di kedua negara tersebut menggunakan sistem pendingin ruangan. Akan tetapi, di Eropa Utara (Norwegia dan Finlandia), kebutuhan energinya meningkat di musim dingin karena mereka membutuhkan sistem pemanas ruangan.

Dari seluruh grafik rata-rata harian pada siklus antar tahun yang terdapat di Gambar 4.4, terdapat pola produksi dan kebutuhan energi yang sama. Oleh karena itu, terdapat tiga grup data pada penelitian ini yaitu grup *Nordic* yang meliputi wilayah Eropa yang terpengaruh kondisi iklim kutub (Finlandia, Norwegia, dan Belarusia), grup *Oceanic* atau wilayah Eropa yang terpengaruh kondisi samudera Atlantik (Prancis, Jerman, Rumania, dan Inggris), serta grup *Mediterranean* atau wilayah Eropa yang terpengaruh kondisi laut Mediterania (Yunani, Itali, dan Tunisia). Berdasarkan ketiga grup tersebut, urutan analisis data dilakukan dari Eropa utara ke Eropa selatan.

Tabel 4.4 Hasil analisis statistika dasar

PLTB	BR	FIN	FR	GER	GR	IT	NO	RO	AND	GAL	TU	UK
Rata-rata	6,50	4,98	7,04	7,50	7,17	7,25	10,84	5,38	5,86	5,91	9,16	9,71
Variasi data	15,88	11,30	20,27	18,77	21,72	17,68	35,76	12,89	14,11	14,15	22,87	29,36
PLTS	BR	FIN	FR	GER	GR	IT	NO	RO	AND	GAL	TU	UK
Rata-rata	120,94	96,71	134,64	124,75	159,61	143,60	99,77	143,81	165,16	142,06	168,60	109,89
Variasi data	5450,8	6146,7	4159,3	4899,9	3199,9	3497,5	5926,5	4057,9	2651,9	4038,2	1885,0	4985,5

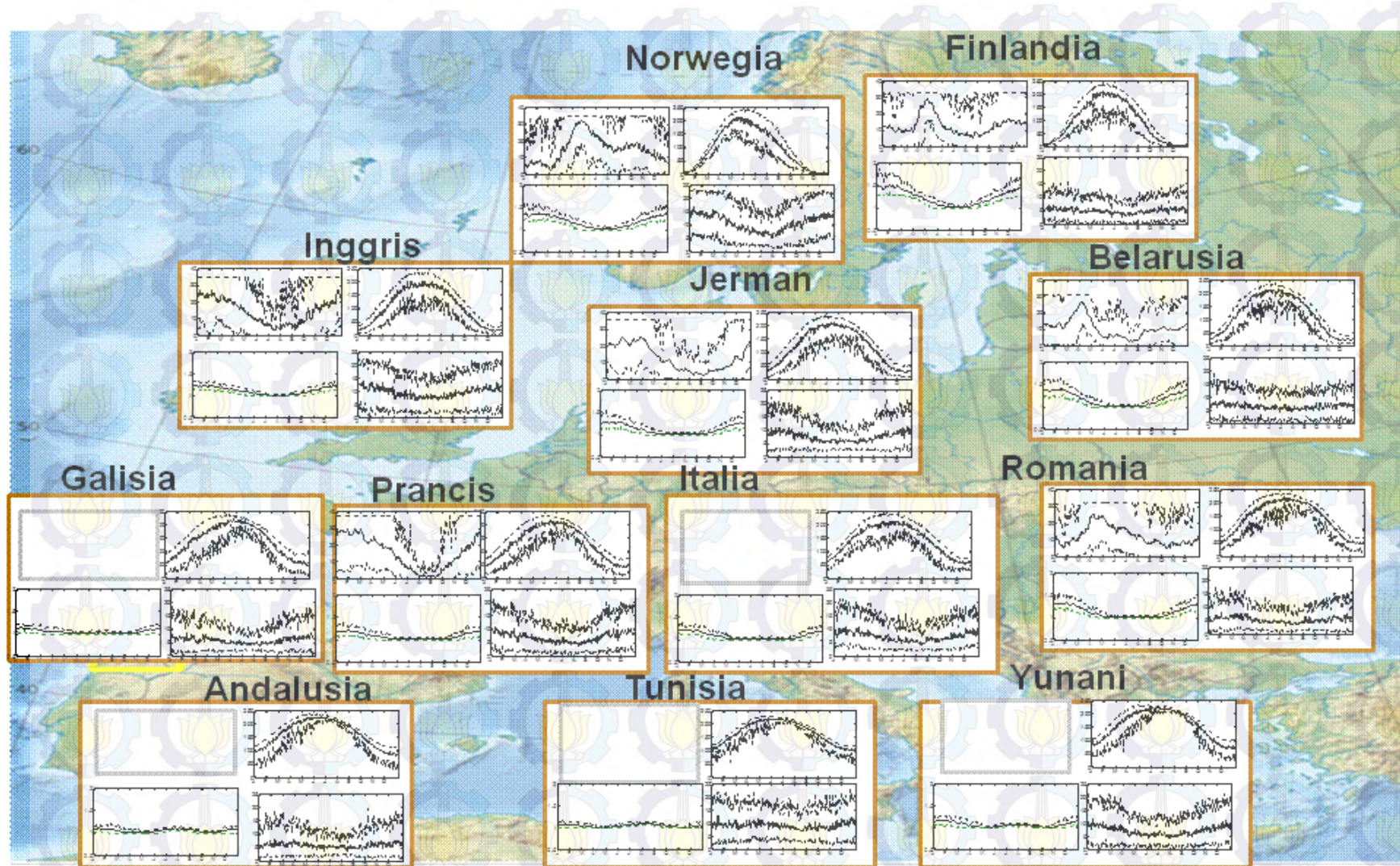
PLTB	BR	FIN	FR	GER	GR	IT	NO	RO	AND	GAL	TU	UK
Rata-rata	10,86	12,99	15,18	12,84	-	-	15,23	12,40	-	-	-	14,55
Variasi data	100,75	126,32	188,46	149,21	-	-	150,86	117,12	-	-	-	154,25
KEBUTUHAN ENERGI	BR	FIN	FR	GER	GR	IT	NO	RO	AND	GAL	TU	UK
Rata-rata	1,17	1,23	1,08	1,12	1,07	1,08	1,19	1,13	1,05	1,05	1,04	1,04
Variasi data	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Setelah menghitung statistika dasar pada seluruh produksi dan kebutuhan energi, dilakukan perhitungan koefisien korelasi menggunakan data yang telah distandarisasi (Tabel 4.5). Pada tabel korelasi tersebut terdapat tiga warna yang berbeda yaitu:

- Koefisien korelasi $> 0,3$ (kuning)
- $0,3 \leq$ Koefisien korelasi $\leq -0,3$ (tanpa warna)
- Koefisien korelasi $< -0,3$ (oranye)

Penggunaan warna-warna ini bukan hanya untuk memberi informasi tentang korelasi yang nilainya kurang dari 0,6 (ambang batas penentuan kedekatan korelasi antar produksi energi), namun juga memberi informasi tentang produksi energi pada negara yang memiliki keterkaitan kuat dengan negara lain. Nilai korelasi diantara 0,3 dan -0,3 tidak diberi warna karena adanya variasi data yang tidak dapat dijelaskan (*unexplained variation*). Variasi data ini dapat disebabkan oleh adanya faktor luar yang mempengaruhi analisis produksi energi (Taylor, 1990).

Apabila terdapat dua negara yang koefisien korelasinya lebih dari 0,3; dapat dikatakan bahwa kedua negara tersebut memiliki pola fluktuasi sumber energi yang sama. Apabila kedua negara tersebut memiliki koefisien korelasi kurang dari 0,3; pola fluktuasi sumber energinya berbeda sehingga terdapat potensi dapat dilakukan transfer energi di kedua negara tersebut. Contohnya, terdapat potensi transfer energi dari PLTB antara Andalusia dan Yunani karena koefisien korelasinya hanya -0,04 (Tabel 4.4).



Gambar 4.4 Grafik perhitungan rata-rata harian data antar tahun pada produksi energi

Pada perhitungan harian, nilai korelasi antar negara pada PLTS adalah yang tertinggi (mencapai 0,79 hingga 0,88). Pada PLTB, nilai korelasi tertinggi adalah produksi energi antara Galisia dan Prancis. Terdapat beberapa nilai korelasi yang nol atau mendekati nol seperti pada Tunisia-Norwegia, Tunisia-Finlandia, Tunisia-Galisia, dan Romania-Finlandia. Nilai korelasi ini menunjukkan kesamaan karakter produksi energi antar negara. Sehingga apabila suatu negara mengalami kekurangan produksi energi, negara lain dapat mendukung produksi energinya. Pada PLTA, korelasi tertinggi terjadi antara Prancis dan Inggris (0,62) dan yang terendah adalah antara Prancis dan Norwegia (-0,29). Nilai korelasi kurang dari nol atau negatif menunjukkan bahwa salah satu produksi energi meningkat di saat yang lain menurun. Koefisien korelasi pada kebutuhan energi antara Yunani dan Finlandia merupakan nilai terendah (-0,07) dan yang tertinggi adalah antara Finlandia dan Norwegia. Nilai korelasi pada kebutuhan energi lebih bervariasi dibandingkan pada produksi energi karena bergantung pada variasi musimannya. Selain itu, koefisien-koefisien ini menunjukkan bahwa pola produksi dan kebutuhan energi pada wilayah Mediterania (Eropa selatan) berbeda dengan wilayah yang lain.

Nama-nama negara pada Tabel 4.5 diurutkan dari Eropa utara ke selatan yaitu Norwegia (NO), Finlandia (FIN), Inggris (UK), Jerman (GER), Belarusia (BR), Prancis (FR), Romania (RO), Galisia (SPG), Andalusia (SPA), Italia (IT), Yunani (GR), dan Tunisia (TU).

Tabel 4.5 Koefisien korelasi produksi dan kebutuhan energi menggunakan data yang telah terstandarisasi

PLTS												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,88	0,84	0,84	0,87	0,82	0,84	0,79	0,85	0,82	0,84	0,87
FIN		1,00	0,84	0,85	0,87	0,83	0,84	0,80	0,84	0,82	0,83	0,86
UK			1,00	0,83	0,85	0,83	0,83	0,80	0,82	0,80	0,83	0,84
GER				1,00	0,87	0,86	0,86	0,79	0,82	0,86	0,83	0,84
BR					1,00	0,85	0,88	0,81	0,85	0,83	0,85	0,87
FR						1,00	0,84	0,84	0,82	0,83	0,83	0,84

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
RO							1,00	0,81	0,85	0,83	0,86	0,86
SPG								1,00	0,84	0,80	0,81	0,81
SPA									1,00	0,82	0,85	0,87
IT										1,00	0,82	0,84
GR											1,00	0,85
TU												1,00
PLTB												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,32	0,21	0,17	0,10	0,13	0,03	0,07	0,06	0,11	0,10	0,00
FIN		1,00	0,12	0,07	0,16	0,07	0,00	0,02	0,02	0,02	0,09	0,00
UK			1,00	0,04	0,10	0,24	0,04	0,11	-0,05	0,10	0,41	0,03
GER				1,00	0,04	0,07	0,26	0,04	0,10	0,25	0,08	0,22
BR					1,00	0,07	0,30	0,03	0,04	0,09	0,21	-0,01
FR						1,00	0,07	0,50	0,13	0,18	0,38	0,01
RO							1,00	0,07	0,08	0,32	0,23	0,08
SPG								1,00	0,44	0,09	0,13	0,00
SPA									1,00	0,09	-0,04	0,04
IT										1,00	0,47	0,34
GR											1,00	0,05
TU												1,00
PLTA												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,37	-0,28	-0,25	-0,06	-0,29	0,08					
FIN		1,00	0,19	0,23	0,34	0,20	0,17					

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
UK			1,00	0,50	0,27	0,62	0,02					
GER				1,00	0,41	0,60	0,26					
BR					1,00	0,25	0,28					
FR						1,00	0,11					
RO							1,00					
KEBUTUHAN ENERGI												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,89	0,85	0,79	0,81	0,70	0,70	0,53	-0,03	0,72	0,37	-0,24
FIN		1,00	0,80	0,80	0,87	0,72	0,77	0,55	0,01	0,75	0,46	-0,17
UK			1,00	0,87	0,80	0,82	0,74	0,62	0,03	0,79	0,43	-0,18
GER				1,00	0,88	0,89	0,85	0,66	0,17	0,89	0,57	-0,03
BR					1,00	0,77	0,90	0,60	0,09	0,82	0,60	-0,07
FR						1,00	0,75	0,78	0,31	0,88	0,53	0,06
RO							1,00	0,60	0,17	0,84	0,77	0,05
SPG								1,00	0,58	0,70	0,48	0,16
SPA									1,00	0,31	0,34	0,59
IT										1,00	0,67	0,15
GR											1,00	0,40
TU												1,00

Selain membahas perhitungan korelasi produksi dan kebutuhan energi pada setiap negara secara individu, analisis statistika dasar pada bagian ini juga membahas hasil perhitungan korelasi antara produksi dan kebutuhan energi di setiap negara. Perhitungan ini dilakukan pada data mulai 1980 hingga 2004 karena data debit sungai yang tersedia hanya terbatas hingga 2004. Berdasarkan Tabel 5.5, energi dari PLTS memiliki nilai korelasi yang negatif pada hampir seluruh negara. Hal tersebut menunjukkan bahwa saat produksi energi

dari PLTS meningkat, produksi energi pada sistem yang lain menurun. Kasus tersebut juga terjadi antara PLTS dan kebutuhan energi. Perhitungan koefisien korelasi diurutkan dari energi yang memiliki variasi musiman yang tinggi hingga yang rendah yaitu PLTS (S), PLTB (W), PLTA (H), dan kebutuhan energi (D).

Tabel 4.6 Koefisien korelasi antara seluruh produksi dan kebutuhan energi

FIN	S	W	H	D	FR	S	W	H	D	GER	S	W	H	D
S	1.00	-0.19	-0.02	-0.69	S	1.00	-0.37	-0.37	-0.62	S	1.00	-0.35	-0.23	-0.69
W		1.00	0.10	0.12	W		1.00	0.31	0.20	W		1.00	0.22	0.22
H			1.00	0.02	H			1.00	0.33	H			1.00	0.31
D				1.00	D				1.00	D				1.00
NO	S	W	H	D	RO	S	W	H	D	BR	S	W	H	D
S	1.00	-0.41	0.39	-0.63	S	1.00	-0.22	0.21	-0.72	S	1.00	-0.18	-0.07	-0.73
W		1.00	-0.07	0.31	W		1.00	0.07	0.14	W		1.00	0.10	0.09
H			1.00	-0.37	H			1.00	-0.18	H			1.00	0.10
D				1.00	D				1.00	D				1.00
UK	S	W	H	D										
S	1.00	-0.30	-0.42	-0.65										
W		1.00	0.40	0.21										
H			1.00	0.38										
D				1.00										

4.2 Analisis Produksi Energi

4.2.1 Analisis Kinerja Produksi Energi

Untuk mengukur kinerja produksi energi, analisis RRV dapat digunakan. Nilai *resiliency* maksimum pada Tabel 4.7 didukung oleh nilai *vulnerability* untuk mengetahui secara langsung intensitas defisit energi ketika periode kelangkaan energi terjadi. Berdasarkan garis ambang batas konstan, durasi kelangkaan energi paling lama terjadi di produksi energi dari PLTA pada 19 Juli–20 Desember 1990 dan 17 Februari–21 Juli 2001 (154 hari). Lamanya kelangkaan ini mengakibatkan angka *resiliency*-nya hanya 0,01. Defisit energi pada periode tersebut adalah 10,19 MW per hari. Selain menghitung kelangkaan pada setiap sumber energi, perhitungan kelangkaan pada kombinasi sumber energi juga dilakukan. Defisit energi tertinggi pada perhitungan ini terjadi pada kombinasi produksi energi dari PLTA dan PLTS di Belarusia (77,08 MW/hari) pada tanggal 13 Maret–25 Juli 1985 (134 hari).

Sedangkan hasil perhitungan menggunakan garis ambang batas harian menunjukkan bahwa periode kelangkaan energi paling lama terjadi pada PLTA Jerman tanggal 26 Maret – 7 Desember 1990 (256 hari). Meskipun angka *resiliency* pada perhitungan ini lebih kecil daripada angka *resiliency* pada analisis yang menggunakan garis ambang batas konstan ($< 0,01$) dan durasinya lebih lama, defisit energinya hanya 20,82 MW/hari. Hal tersebut berarti bahwa defisit energi pada perhitungan menggunakan garis ambang batas harian berlangsung lebih lama dengan intensitas yang lebih kecil. Oleh karena itu, analisis kelangkaan energi pada penelitian ini tidak hanya dibatasi pada durasi kelangkaan energi, namun juga pada intensitas defisit energi. Berdasarkan perhitungan *resiliency* menggunakan metode rata-rata, rata-rata tertinggi terjadinya kelangkaan energi adalah 51 hari di PLTA Finlandia.

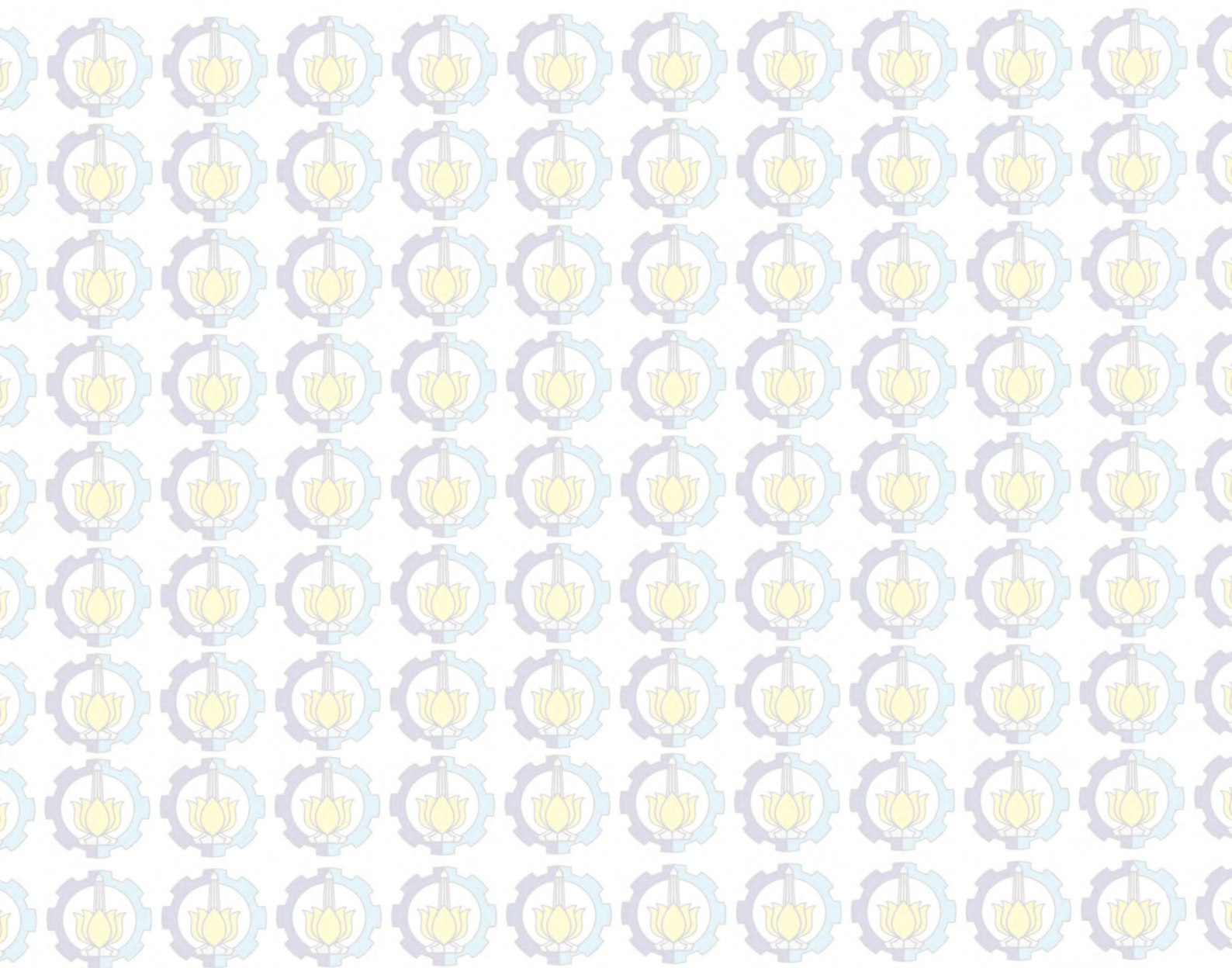
Hasil perhitungan *vulnerability* pada Tabel 4.8 menunjukkan defisit energi yang terjadi di seluruh serial data selama 33 tahun. Rata-rata defisit energi tertinggi dari perhitungan menggunakan garis ambang batas konstan adalah pada kombinasi energi dari PLTS dan PLTA di Belarusia (9.48 MW/hari), sedangkan perhitungan menggunakan garis ambang batas harian menunjukkan bahwa PLTS Andalusia rata-rata mengalami defisit 2,66 MW/hari selama 33 tahun.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan resiliency dan durasi terjadinya kelangkaan energi

ENERGI	RESILIENCY (RATA-RATA)						RESILIENCY (MAKSIMUM)									
	GARIS AMBANG BATAS KONSTAN			GARIS AMBANG BATAS HARIAN			GARIS AMBANG BATAS KONSTAN					GARIS AMBANG BATAS HARIAN				
	NEGARA	DURASI	RESILIENCY	NEGARA	DURASI	RESILIENCY	NEGARA	DURASI	TANGGAL	INTENSITAS (MW/HARI)	RESILIENCY	NEGARA	DURASI	TANGGAL	INTENSITAS (MW/HARI)	RESILIENCY
PLTA	FIN	50,72	0,02	BR	32,12	0,03	GER	154	19/7/1990 - 20/12/1990	10,19	0,01	GER	256	26/3/1990 - 7/12/1990	20,82	< 0,01
									17/2/2001 - 21/7/2001							
PLTS	BR	28,69	0,03	AND	23,09	0,04	GAL	84	25/9/1998 - 18/12/1998	19,84	0,01	GAL	102	18/12/1995 - 29/3/1996	24,01	0,01
	RO	28,69	0,03													
PLTB	NO	13,53	0,07	UK	9,27	0,11	TU	74	8/12/1990 - 20/2/1991	19,23	0,01	AND	68	1/11/2001 - 8/1/2002	12,06	0,01
PLTA+PLTS	BR	48,72	0,02	FR	43,55	0,02	BR	134	13/3/1985 - 25/7/1985	77,08	0,01	FR	150	6/10/1985 - 5/3/1986	7,39	0,01
PLTS+PLTB	IT	14,18	0,07	GER	9,68	0,10	IT	43	18/9/1999 - 31/10/1999	10,09	0,02	BR	66	6/2/2008 - 12/4/2008	13,60	0,02
							NO	43	26/11/2009 - 8/1/2010	13,51	0,02					
PLTA+PLTB	NO	23,00	0,04	FIN	46,34	0,02	GER	72	8/12/1998 - 18/2/1999	13,04	0,01	FIN	304	20/2/1993 - 21/12/1993	25,76	< 0,01
SELURUH ENERGI	NO	21,70	0,05	FIN	15,82	0,06	NO	81	18/5/1985 - 7/8/1985	30,82	0,01	FIN	59	1/6/2002 - 30/7/2002	22,36	0,02

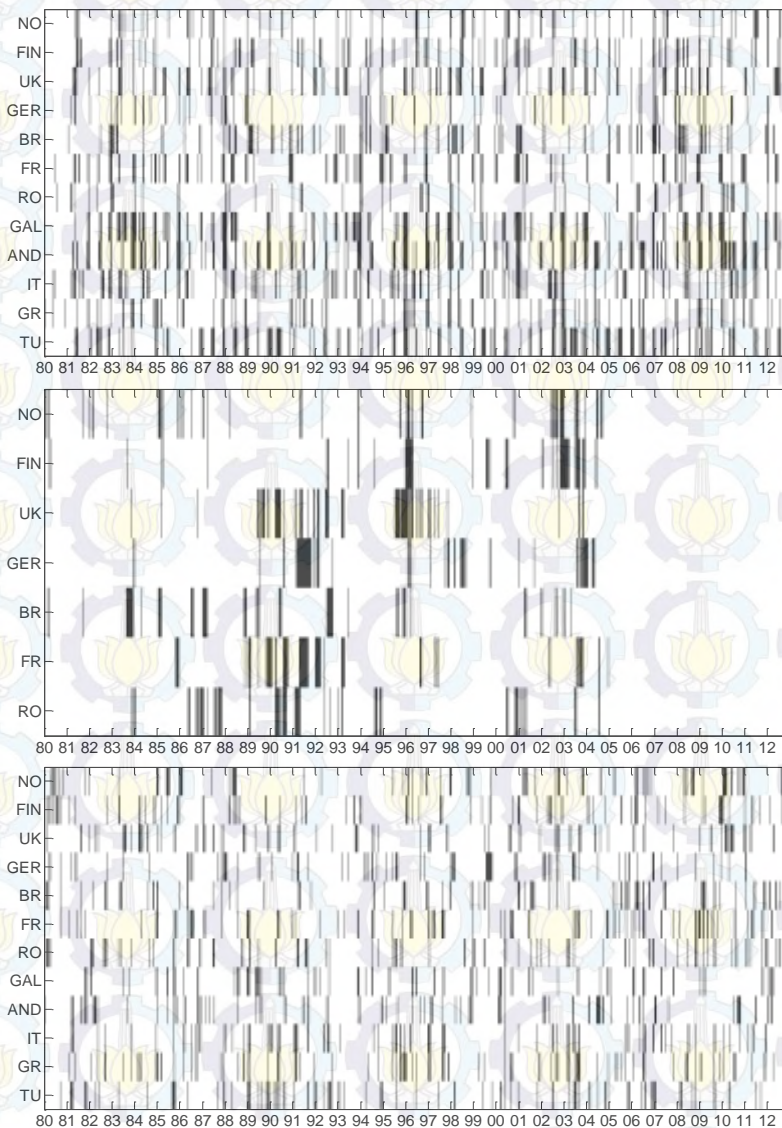
Tabel 4.8 Hasil perhitungan intensitas kelangkaan energi selama 33 tahun

ENERGI	INTENSITAS (RATA-RATA)				INTENSITAS (MAKSIMUM)			
	GARIS AMBANG BATAS KONSTAN		GARIS AMBANG BATAS HARIAN		GARIS AMBANG BATAS KONSTAN		GARIS AMBANG BATAS HARIAN	
	NEGARA	INTENSITAS (MW/HARI)	NEGARA	INTENSITAS (MW/HARI)	NEGARA	INTENSITAS (MW/HARI)	NEGARA	INTENSITAS (MW/HARI)
PLTA	NO	2,63	UK	2,65	FIN	24,82	FIN	44,29
PLTS	AND	4,27	AND	2,66	AND	20,64	GAL	24,01
PLTB	NO	1,75	AND	1,44	TU	19,23	FR	16,12
PLTA+PLTS	BR	9,48	UK	2,45	BR	77,08	UK	34,77
PLTS+PLTB	IT	2,20	GER	1,50	NO	13,51	BR	13,60
PLTA+PLTB	UK	1,76	UK	2,20	FIN	17,64	RO	28,77
SELURUH ENERGI	NO	3,21	FIN	1,83	NO	30,82	FIN	22,36

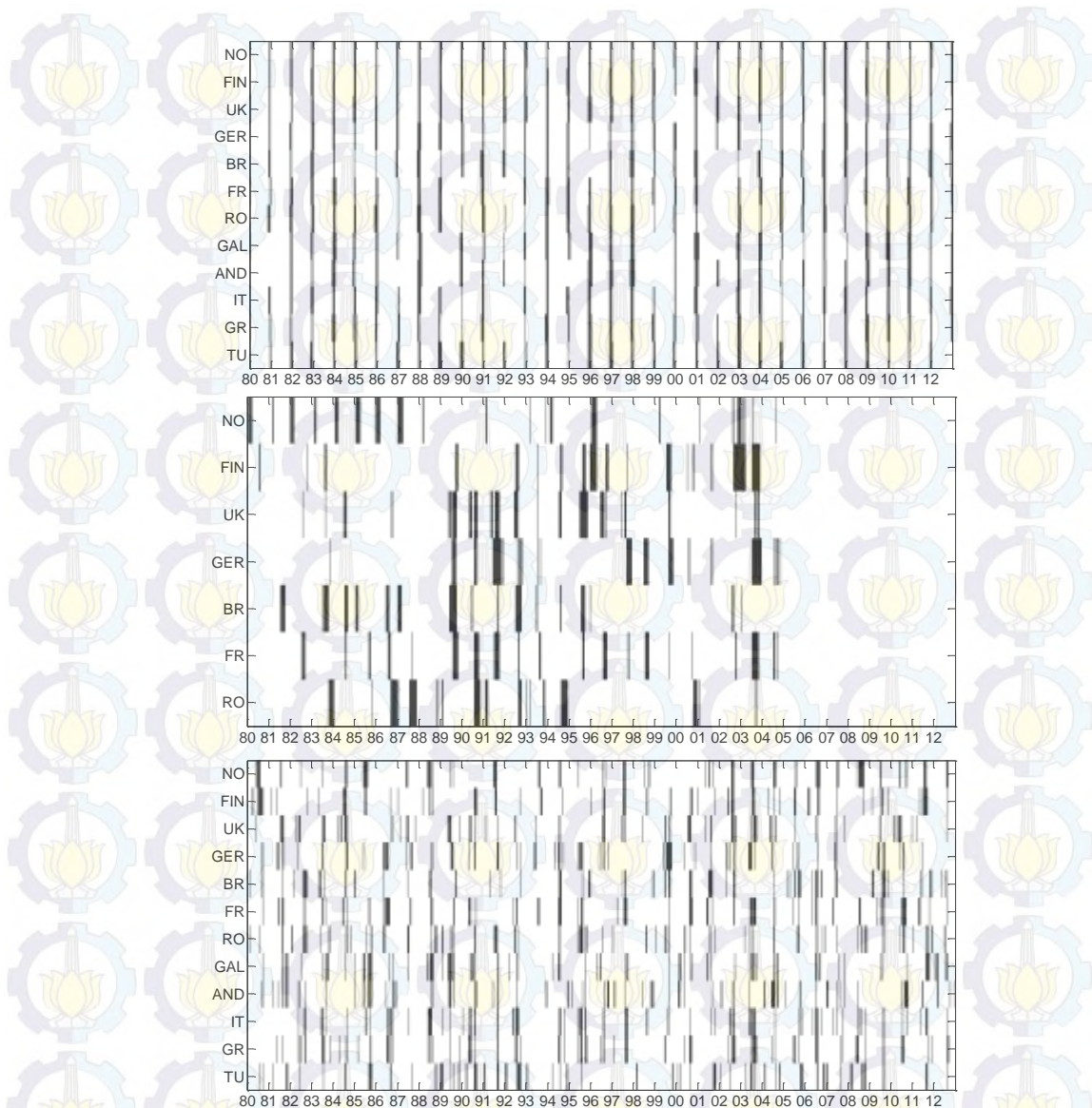


4.3.2 Analisis Indeks Kelangkaan Energi

Untuk menganalisis kelangkaan energi, bukan hanya analisis RRV yang dapat digunakan namun juga indeks kelangkaan energi menggunakan angka biner. Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6, angka-angka biner ini disusun dari wilayah utara hingga selatan Eropa berdasarkan hasil pengelompokan pada bagian analisis statistik. Karena angka biner hanya terdiri dari 1 (ketika produksi energi lebih rendah dari garis ambang batas) dan 0, maka hanya ada 2 warna yang digunakan dalam pembentukan grafik yaitu hitam (0) dan putih (1).



Gambar 4.5 Plot angka-angka biner menggunakan metode *mesh plots* pada PLTS, PLTA, dan PLTB (garis ambang batas harian)



Gambar 4.6 Plot angka-angka biner menggunakan metode *mesh plots* pada PLTS, PLTA, dan PLTB (garis ambang batas konstan)

Dengan menggunakan indeks kelangkaan energi dan grafik rata-ratanya pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6, musim dimana probabilitas terjadinya kekurangan energi di 12 negara dapat diidentifikasi. Grafik rata-rata tersebut diperoleh dari perhitungan rata-rata angka biner per hari. Berdasarkan garis ambang batas konstan, kelangkaan energi dari PLTS terjadi di setiap musim dingin, dari PLTA terjadi hampir setiap bulan Mei hingga September, dan dari PLTB terjadi hampir setiap bulan Juli hingga Nopember. Produksi energi dari

PLTB bergantung pada kecepatan angin musiman. Pada bulan Juli hingga Nopember (musim panas), tekanan udara lebih sedikit dan lebih lemah sehingga kecepatan angin penggerak turbin kincir semakin kecil.

Akan tetapi, probabilitas tersebut berbeda hasilnya pada perhitungan indeks menggunakan garis ambang batas harian. Karena penggunaan persentil kesepuluh pada perhitungan garis ambang batas yang didasarkan pada data harian ini, maka rendahnya produksi energi dapat terjadi di setiap tahun. Probabilitas tertinggi terjadinya kelangkaan energi pada PLTS adalah pada bulan November hingga Januari (musim dingin), pada PLTA terjadi bulan April hingga Agustus, dan pada PLTB terjadi pada bulan Maret hingga Mei.

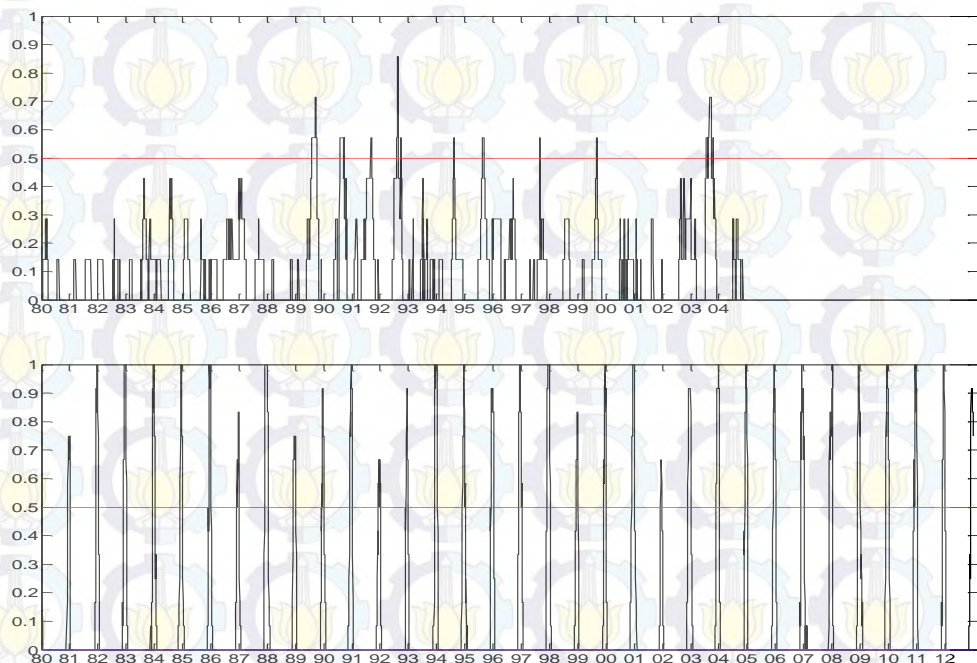
Kelangkaan energi dapat dibandingkan antar Negara berdasarkan frekuensi terjadinya dan intensitasnya. Apabila kelangkaan energi pada PLTS di Tunisia dan Italia dibandingkan, defisit energi di Italia lebih sering terjadi, namun intensitasnya lebih kecil dibandingkan dengan kelangkaan energi pada Tunisia. Hal tersebut juga terjadi pada PLTA di Jerman, Inggris, dan Norwegia. Kelangkaan energi pada PLTA di Jerman dan Inggris memiliki durasi lebih lama dibandingkan di Norwegia, tetapi kelangkaan tersebut terjadi lebih sering di Norwegia dengan durasi lebih pendek. Berdasarkan perbandingan tersebut, penelitian ini difokuskan pada kedua analisis tersebut; durasi dan intensitas (Tabel 4.7 dan 4.8).

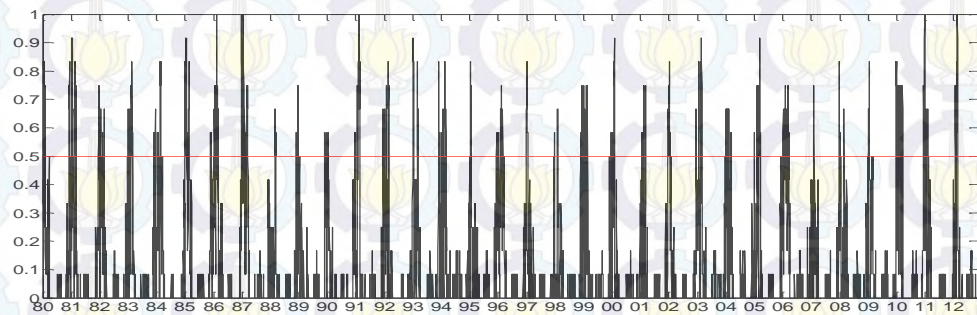
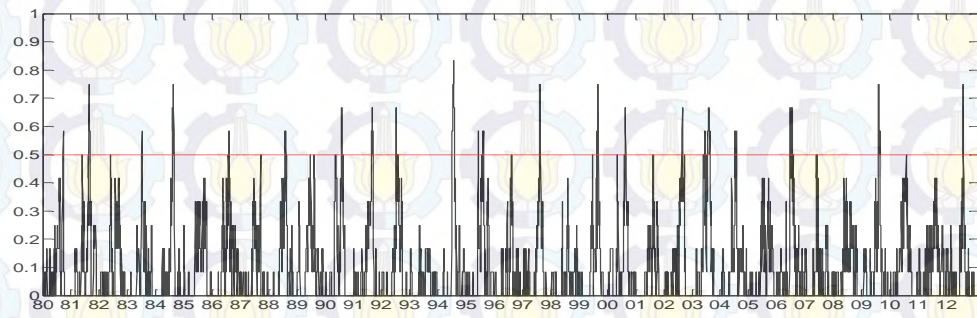
Selain itu, perhitungan grafik rata-rata bertujuan untuk menganalisis adanya hubungan kelangkaan produksi energi antar negara. Apabila rata-rata angka biner adalah satu, maka dapat diartikan bahwa seluruh Negara dalam area studi mengalami kekurangan produksi energi. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui negara mana saja yang dapat memproduksi energi lebih tinggi daripada Negara yang lain sehingga dapat digunakan sebagai analisis transfer energi antar Negara pada penelitian selanjutnya. Grafik rata-rata pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dilengkapi dengan garis batas 0,5 yang berguna untuk menganalisis periode ketika lebih dari enam negara mengalami kekurangan produksi energi.

Berdasarkan grafik rata-rata tersebut, kelangkaan energi dari PLTA selalu lebih panjang durasinya dibandingkan dari PLTA dan PLTS. Pada Gambar 4.7, terdapat 21 kejadian dimana produksi energi PLTB kurang dari garis ambang

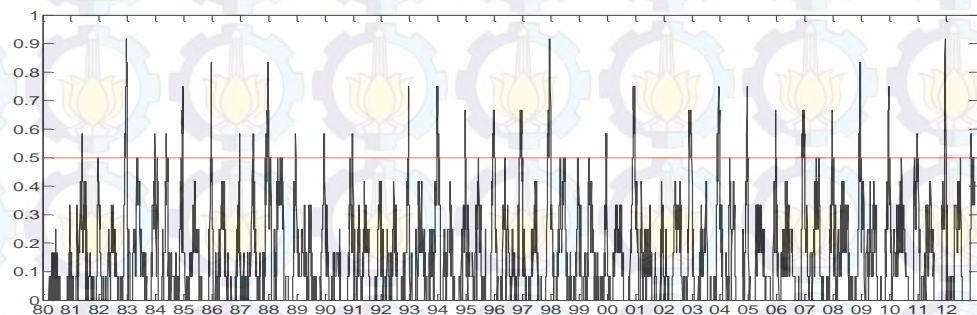
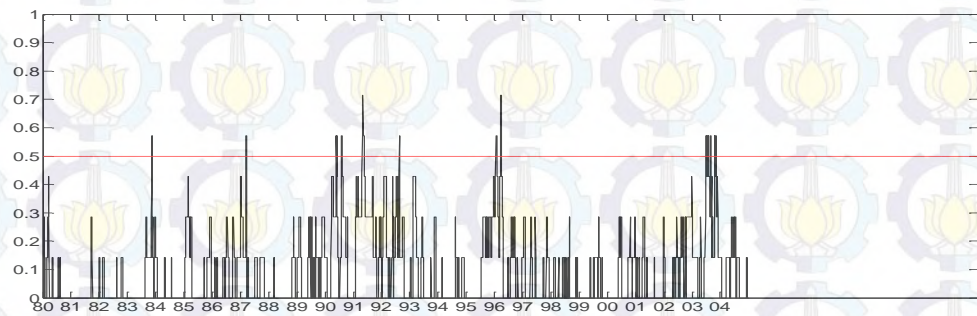
batas konstan pada lebih dari setengah area studi (rata-rata lebih dari 0,5), namun hanya 9 kejadian untuk PLTA. Akan tetapi, 9 kejadian yang terjadi di PLTA tersebut lebih panjang durasinya dibandingkan dengan 21 kejadian di PLTB. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa kelangkaan energi pada PLTB sering terjadi, namun durasi masing-masing kejadian tidak terlalu lama. Hal tersebut juga terjadi di grafik rata-rata hasil perhitungan menggunakan garis ambang batas harian (Gambar 4.8).

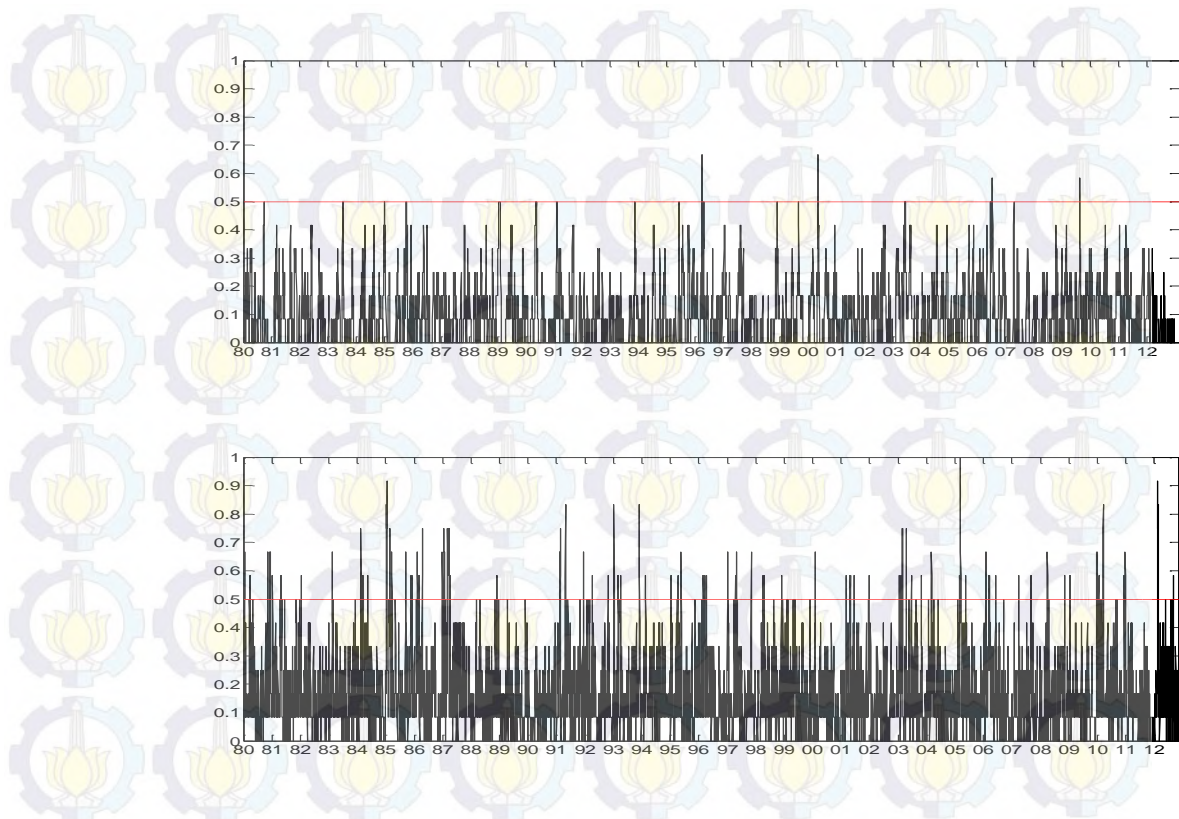
Kelangkaan energi dari PLTS yang dihitung menggunakan garis ambang batas konstan pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa terdapat koherensi musiman antar negara karena angka maksimum dan minimum hampir seragam setiap tahunnya (selalu terjadi kelangkaan energi setiap musim dingin di seluruh wilayah studi). Hasil tersebut membuktikan bahwa adanya pengaruh musiman yang kuat pada jumlah radiasi tahunan. Grafik rata-rata terakhir merupakan grafik dari kebutuhan energi. Probabilitas tertinggi ketika kebutuhan energi berlebih dari hasil perhitungan kedua garis ambang batas terjadi pada bulan Oktober hingga Februari.





Gambar 4.7 Grafik rata-rata kelangkaan energi pada PLTA, PLTS, PLTB, dan kebutuhan energi (garis ambang batas konstan)





Gambar 4.8 Grafik rata-rata kelangkaan energi pada PLTA, PLTS, PLTB, dan kebutuhan energi (garis ambang batas harian)

Defisit-defisit energi ini dapat diatasi dengan mengombinasikan seluruh sumber energi. Karena serial data pada PLTA hanya hingga 2004, maka analisis kombinasi energi ini terbatas hanya hingga 2004. Kombinasi energi dilakukan dengan cara menjumlahkan angka-angka biner yang telah diperoleh sebelumnya. Apabila angka biner pada PLTA menunjukkan angka 0 (terjadi kelangkaan energi), hal tersebut dapat diatasi oleh produksi energi dari PLTS atau pun PLTB. Oleh karena terbatasnya data dari PLTA, terdapat dua jenis perhitungan kombinasi energi yaitu penjumlahan angka biner hanya dari PLTS dan PLTB mulai 1980 hingga 2012 dan penjumlahan dari seluruh energi mulai 1980 hingga 2004 (Gambar 5.10). Selanjutnya, metode *mesh plot* kembali digunakan dalam grafik kombinasi energi ini. Karena pada analisis ini angka biner minimum adalah 0 dan maksimum adalah 3, maka semakin gelap warna pada grafik, semakin rendah produksi energinya.

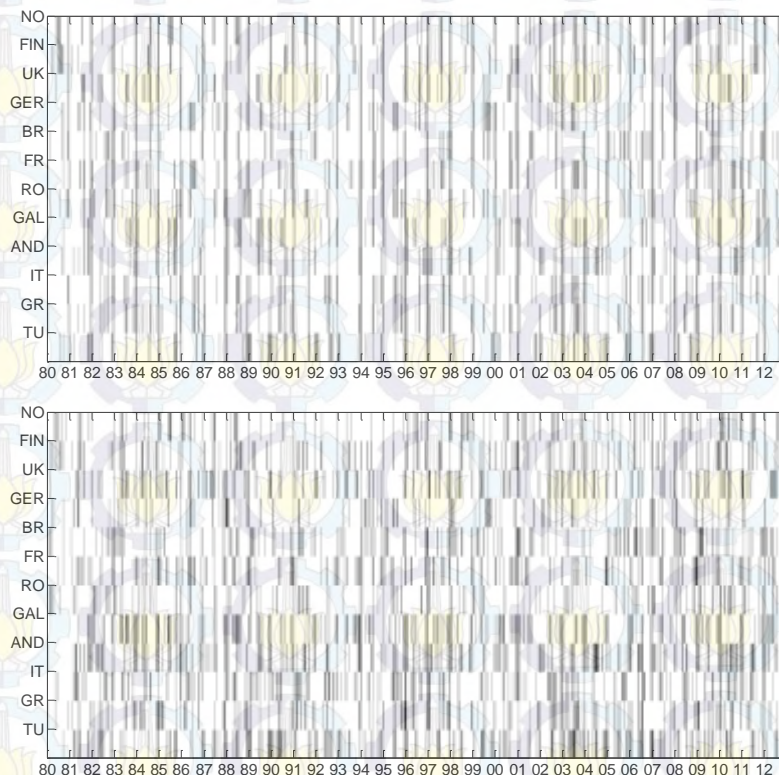
Untuk mendukung analisis kombinasi tersebut, pada Tabel 4.9, terdapat daftar periode terjadinya kelangkaan energi pada setiap sumber energi yang disertai dengan daftar negara yang dapat memproduksi energi berlebih ketika negara lain mengalami defisit produksi. Berdasarkan tabel ini, Belarusia selalu dapat memproduksi energi berlebih pada hasil perhitungan menggunakan garis ambang batas harian. Produksi energi pada PLTS yang dihitung menggunakan garis ambang batas konstan menunjukkan adanya defisit energi setiap musim dingin dan Andalusia selalu dapat memproduksi energi lebih kecuali pada tahun 1981, 1987, 1989, 1995, dan 1999. Kelangkaan energi dari PLTA terjadi di seluruh negara pada 8-14 Agustus 1992 kecuali produksi dari Norwegia. Sedangkan untuk produksi energi dari PLTB, kelangkaan energi terjadi pada tanggal 20 Juli 1994. Seluruh wilayah studi mengalami kelangkaan ini kecuali di Finlandia dan Andalusia.

Selain itu, terdapat beberapa periode ketika kebutuhan energi mencapai puncaknya hingga grafik rata-rata pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan angka satu (terjadi konsumsi energi yang berlebih di seluruh area studi). Berdasarkan perhitungan melalui garis ambang batas konstan, periode tersebut terjadi pada awal tahun 1986, 1987, 1991, 2011, dan 2012. Sedangkan berdasarkan perhitungan menggunakan garis ambang batas harian, periode tersebut terjadi pada awal tahun 2005. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh penggunaan sistem pendingin ruangan yang berlebih di puncak musim dingin (bulan Januari).

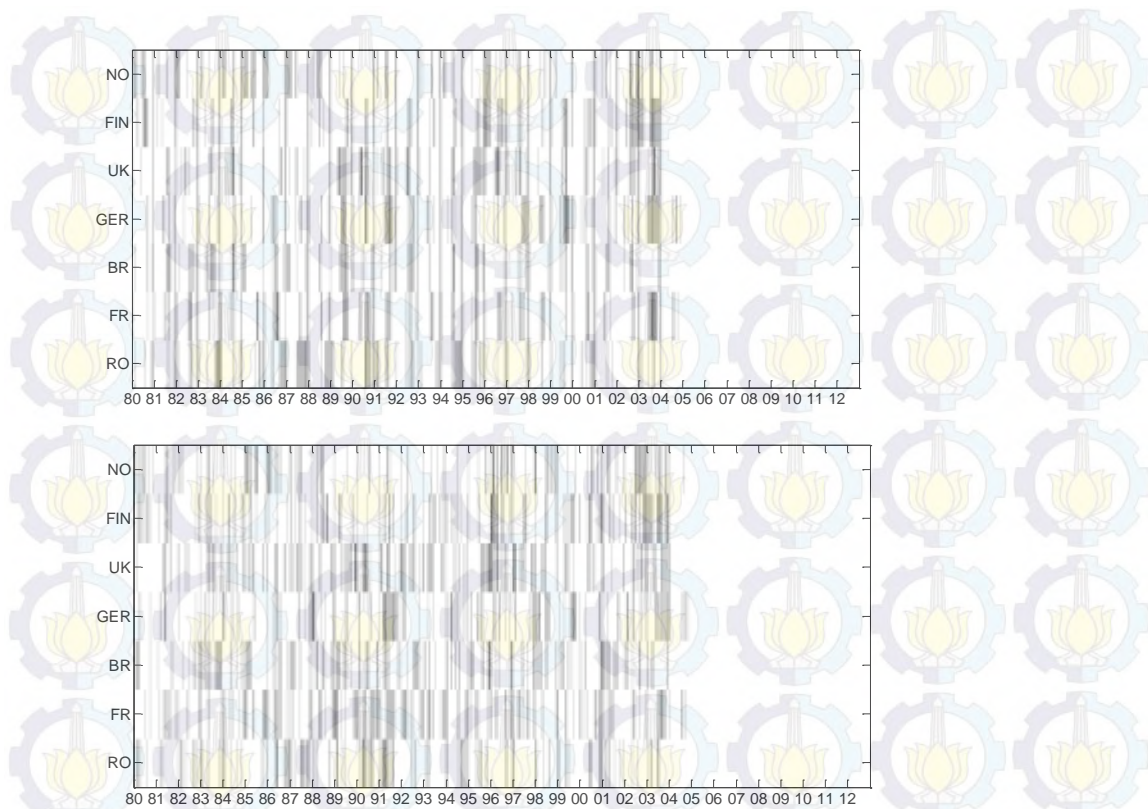
Tabel 4.9 Daftar periode kelangkaan energi yang terjadi serentak di seluruh wilayah studi

Sumber energi	Periode puncak defisit energi	Negara yang dapat memproduksi energi lebih tinggi dari lainnya
Garis ambang batas harian		
PLTS	12-14 Desember 1982	Norwegia dan Tunisia
	5-16 Desember 1997	Finlandia dan Belarusia
	9-11 Desember 2011	Inggris
PLTA	22 April–2 Mei 1991	Finlandia dan Belarusia

Sumber energi	Periode puncak defisit energi	Negara yang dapat memproduksi energi lebih tinggi dari lainnya
PLTB	19-23 Maret 1996	Prancis dan Romania
	26-28 Maret 1996	Jerman, Belarusia, Romania, Yunani, dan Tunisia
	3-6 Mei 2000	Inggris, Jerman, Belarusia, Galisia
Garis ambang batas konstan		
PLTA	6-23 September 1989	Norwegia dan Romania
	5-17 Agustus 1992	Norwegia dan Romania
	22 Agustus–20 September 2003	Norwegia dan Belarusia
PLTB	80-21 Juli 1994	Finlandia dan Andalusia
	31 Juli–10 Agustus 2009	Norwegia, Inggris, dan Andalusia
	31 Juli–1 Agustus 2012	Belarusia dan Andalusia



Gambar 4.9 Kombinasi energi dari PLTS dan PLTB menggunakan garis ambang batas harian



Gambar 4.10 Kombinasi energi dari PLTS dan PLTB menggunakan garis ambang batas konstan (atas) dan harian (bawah)

Berdasarkan Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, analisis periode ketika defisit energi terjadi di 12 negara dapat dilakukan. Pada 1995 hingga 1997, produksi energi di seluruh negara terbukti sangat rendah. Untuk mengevaluasi kondisi ini, dilakukan analisis koefisien korelasi yang didasarkan pada angka-angka biner atau indeks kelangkaan energi (Tabel 4.10 Tabel 4.11). Hasil perhitungan korelasi ini menunjukkan bahwa Finlandia dan Norwegia selalu memiliki korelasi yang tinggi dalam hal kelangkaan energi sehingga dapat dikatakan bahwa karakteristik periode terjadinya kelangkaan energi di kedua negara ini hampir sama baik menggunakan perhitungan dari garis ambang batas konstan maupun harian. Akan tetapi, Belarusia dan Finlandia memiliki nilai korelasi yang rendah dibandingkan dengan negara yang lain. Detail koefisien korelasi pada seluruh sumber energi terdapat pada Lampiran A.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan garis ambang batas harian

PLTS + PLTB + PLTA							
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO
NO	1,00	0,25	0,06	0,04	-0,03	0,05	0,02
FIN		1,00	0,08	0,10	0,05	0,05	0,01
UK			1,00	0,07	0,02	0,21	0,05
GER				1,00	0,08	0,13	0,14
BR					1,00	-0,04	0,08
FR						1,00	0,13
RO							1,00

Tabel 4.11 Hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan garis ambang batas konstan

PLTS + PLTB + PLTA							
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO
NO	1,00	0,38	0,22	0,14	0,22	0,21	0,19
FIN		1,00	0,35	0,32	0,31	0,37	0,21
UK			1,00	0,33	0,36	0,38	0,22
GER				1,00	0,30	0,43	0,33
BR					1,00	0,35	0,25
FR						1,00	0,30
RO							1,00

4.4 Rekomendasi

Rekomendasi dari penelitian ini yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya adalah :

1. Peramalan data hingga 2050 dapat pula dilakukan untuk mencegah terjadinya kelangkaan energi di masa depan. Peramalan data ini dapat dilakukan berdasarkan data yang ada (1980-2012) dan menghitung data estimasi sebelum tahun 1980. Sehingga peramalan data didasarkan pada data lengkap abad ke-20. Metode ini telah diterapkan oleh Compo *et al.* (2011), pada tema *20th century reanalysis*. Selain itu, peramalan data dapat dilakukan dengan penggunaan metode ARIMA atau *seasonal* ARIMA yang dipilih sesuai dengan nilai *residual* dan *p-valuenya*. Hasil peramalan data dapat digunakan dalam konteks perubahan iklim seperti analisis fluktuasi temperatur global
2. Prediksi data debit air untuk tahun 2005-2012 dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu model regresi linier, berdasar pada penelitian dari Dempster *et al.* (1977) dan Rubin (2009), serta model hidrologi yang didasarkan pada data presipitasi sebagai data meteorologi pendukung. Analisis lain seperti *Vector Autoregressive* (VAR) dapat pula digunakan untuk mengidentifikasi bagaimana sumber-sumber energi ini berkorelasi satu sama lain untuk memenuhi kebutuhan energi dan durasi pemenuhan kebutuhan (ada keterlambatan pemenuhan kebutuhan energi atau tidak)
3. Analisis fluktuasi di Indonesia dapat dilakukan dengan memperhatikan perbedaan berikut:
 - a. Kecepatan angin untuk produksi energi dari PLTB
Kecepatan angin di Indonesia berfluktuasi tinggi setiap jamnya karena Indonesia adalah negara kepulauan sehingga angin dari laut sangat berpengaruh pada kinerja turbin. Selain itu, turbulensi angin yang sering terjadi di musim hujan (6 bulan dalam satu tahun) dapat menghambat produksi energi dari PLTB (Syahrul, 2008). Kedua hal tersebut harus dianalisis fluktuasinya untuk mengetahui periode ketika PLTB tidak dapat memproduksi energi secara maksimal.

b. Debit sungai untuk produksi energi dari PLTA

Musim kemarau yang terjadi selama 6 bulan dalam satu tahun dapat mengurangi debit sungai pada sistem Run of River (RoR). Oleh karena itu, dapat dianalisis durasi dan periode ketika PLTA memproduksi sedikit energi karena debit sungai yang berkurang bukan hanya berpengaruh pada produksi energi, tetapi juga pada kehidupan sosial dan ekonomi (Prihartono, 2008; Wahid, 2009).

c. Radiasi matahari untuk produksi energi dari PLTS

Fluktuasi radiasi matahari setiap musim tidak terlalu berbeda karena Indonesia adalah negara beriklim tropis yang selalu mendapat sinar matahari. Fluktuasi ini dapat dianalisis setiap jam untuk mengetahui rata-rata fluktuasi musiman yang dipengaruhi oleh tutupan awan pada setiap musimnya (Johan, 2008).

Apabila karakteristik fluktuasi energi tersebut dapat diketahui, maka hal tersebut dapat membantu analisis suplai energi dari energi terbarukan yang telah dilaksanakan sejak tahun 2006 (Ariani, 2012).



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian ini adalah :

1. Karakteristik defisit energi dapat dianalisis dari data sumber energi dan hasil perhitungan indeks kelangkaan energi. Berdasarkan pola sumber energi, produksi energi dari PLTS dan konsumsi energi di wilayah utara (wilayah kutub) dan selatan Eropa (wilayah Mediterania) berbeda sesuai dengan fluktuasi temperatur. Produksi energi dari PLTA di wilayah utara, timur (wilayah daratan), dan barat Eropa (wilayah yang berdekatan dengan Samudra Atlantik) sesuai dengan fluktuasi debit air. Sedangkan produksi energi dari PLTB berbeda antara wilayah yang berdekatan dengan Samudera Atlantik dan daratan Eropa karena adanya perbedaan fluktuasi kecepatan angin.
2. Dengan menggunakan indeks kelangkaan energi, periode terjadinya defisit energi dapat diidentifikasi. Terdapat beberapa kejadian penting dalam hal kelangkaan energi, yaitu:
 - a. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan garis ambang batas harian, defisit produksi energi dari PLTS di 12 negara terjadi pada Desember 1982, 1997, dan 2011, dari PLTA terjadi pada April hingga Mei 1991 dan Maret 1996, dan dari PLTB terjadi pada Maret 1996 dan Mei 2000. Sedangkan konsumsi energi yang berlebih terjadi pada tahun 2005
 - b. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan garis ambang batas konstan, kelangkaan energi dari PLTS terjadi di setiap musim dingin karena kurangnya intensitas radiasi matahari, dari PLTA terjadi pada bulan September 1989, Agustus 1992, dan Agustus hingga September 2003, dan dari PLTB terjadi pada bulan Juli 1994, Juli hingga Agustus 2009 dan 2012. Konsumsi energi berlebih terjadi pada awal tahun 1986, 1987, 1991, 2011, dan 2012

- c. Terjadi defisit energi di seluruh sumber energi pada 12 wilayah studi pada tahun 1995 hingga 1997

5.2 Saran

Saran yang didapat dari penelitian ini adalah melengkapi seluruh serial data mulai 1980 hingga 2012 karena tidak ada data debit air setelah 2004 sehingga dapat dihitung kombinasi sumber energinya dan dapat dibandingkan antar sumber energi selama 33 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, D. (2012). *Skenario Kebijakan Energi Indonesia hingga Tahun 2035* (Disertasi). Depok: Universitas Indonesia
- Astutik, S., Iriawan, N., Nair, G., Suhartono, Sutikno (2013). Bayesian State Space Modeling for Spatio-Temporal Rainfall Disaggregation. *International Journal of Applied Mathematics and StatisticsTM* Vol. 37, No. 7:26–37
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2014). *Outlook Energi Indonesia 2014: Pengembangan Energi untuk Mendukung Program Substitusi BBM*. Jakarta: Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Enersi (PTPSE)
- Bossanyi, E. dan King, J. (2012). Improving wind farm output predictability by means of a soft cut-out strategy. *European Wind Energy Conference dan Exhibition 2012* Vol. 3, No. 1: 66–73.
- Center for Research on Material and Energy (2002). *Clean Development Mechanism Project Opportunities in Indonesia: Pre-feasibility Report on a Micro Hydro Power (CDM Project)*. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, Ø., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D. dan Worley, S.J. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* Vol. 137, No. 654:1–28.
- De Boer, C. dan Bressers, H. (2013). *Climate Related Energy Developments in the Netherlands*. CSTM, University of Twente, The Netherlands
- Dempster, A.P., Laird, N.M. dan Rubin, D.B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* Vol. 39, No. 1: 1–38
- Direktorat Jendral Eneegi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (Ditjen EBTKE). (2013). *Statistik EBTKE 2013*. Jakarta: Ditjen EBTKE
- ENTSOE (2013). *Monthly Electricity 2013*. [Online]. Diakses dari: <https://www.entsoe.eu/db-query/country-packages/production-consumption-exchange-package> (12 Agustus 2014)
- European Comission (2012). *Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 98/70/EC*

relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources. [Online]. Diakses dari: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel/docs/com_2012_595_en.pdf (12 Agustus 2014)

European Commission (2014). *EU Energy in Figures: Statistical Pocketbook 2014.* [Online]. Luxembourg. Diakses dari: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2014_pocketbook.pdf (12 Agustus 2014)

Fytilas, P., Koutsoyiannis, D. dan Napolitano, F. (2003). A case study of spatial-temporal rainfall disaggregation at the Tiber river basin, Italy. *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*

Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., Stoffel, M. dan Volonterio, M. (2014). Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of The Total Environment*. Vol. 493: 1211–1221.

Grossmann, W.D., Grossmann, I. dan Steininger, K.W. (2013). Distributed solar electricity generation across large geographic areas, Part I: A method to optimize site selection, generation and storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 25: 831–843

Hannaford, J., Lloyd-Hughes, B., Keef, C., Parry, S. dan Prudhomme, C. (2011). Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes* Vol. 25, No. 7: 1146–1162

Hashimoto, T., Stedinger, J.R. dan Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* Vol. 18, No. 1: 14–20

Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. dan New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*. DOI: 10.1029/2008JD010201

Hiendro, A., Kurnianto, R., Rajagukguk, M., Simanjuntak, Y.M. dan Junaidi (2013). Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia. *Energy* Vol. 59: 652–657.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M. L. Parry (ed.). Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press.

- International Renewable Energy Agency (2012). *Reports and papers : Renewable Energy Cost Analysis - Hydropower*. [Online]. Diperoleh dari: <http://www.irena.org/menu/indeks.aspx?mnu=SubcatdanPriMenuID=36danCatID=141danSubcatID=232>. [Diakses tanggal 7 August 2014].
- Johan, Y. (2008). *Fluktuasi Intensitas Radiasi Matahari pada Kawasan Padat Polusi dan Hijau Kota Solok* (Tesis). Padang: Universitas Andalas
- Kjeldsen, T.R. dan Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems / Choix d'estimateurs de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité pour les analyses de risque de systèmes de ressources en eau. *Hydrological Sciences Journal*. 49 (5). p.pp. 755–767. Available from: [Accessed: 2 December 2014].
- Kothe, S., Good, E., Obregón, A., Ahrens, B. dan Nitsche, H. (2013). Satellite-Based Sunshine Duration for Europe. *Remote Sensing* Vol. 5, No. 6: 2943–2972
- Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Rodriguez, R.C., Devernay, J.-M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, A., Liu, Z., Branche, E., Burkhardt, J., Descloux, S., Heath, G. dan Seelos, K. (2011). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Chapter 5: Hydropower*. Cambridge: U.K
- Lackner, K.S. (2009). Chapter 1 Comparative Impacts of Fossil Fuels and Alternative Energy Sources. In: *Carbon Capture: Sequestration and Storage*. [Online]. Diperoleh dari: <http://pubs.rsc.org/en/content/chapter/bk9781847559173-00001/978-1-84755-917-3>. [7 August 2014].
- Li, Y., Agelidis, V.G., Shrivastava, Y., (2009). Wind-solar resource complementarity and its combined correlation with electricity load demand, in: *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*. pp. 3623–3628.
- Lu, X., McElroy, M.B., Kiviluoma, J., (2009). Global potential for wind-generated electricity. *PNAS*.
- Moriarty, P. dan Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 16, No. 1: 244–252
- Moy, W.-S., Cohon, J.L. dan ReVelle, C.S. (1986). A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research* Vol. 22, No. 4: 489–498

- Nawri, N., Petersen, G.N., Bjornsson, H., Hahmann, A.N., Jónasson, K., Hasager, C.B. dan Clausen, N.-E. (2014). The wind energy potential of Iceland. *Renewable Energy* Vol. 69: 290–299
- Pazouki, S., Haghifam, M.-R. dan Moser, A. (2014). Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response. *International Journal of Electrical Power dan Energy Systems* Vol. 61: 335–345
- Perpiñan, O., Lorenzo, E., Castro, M.A., (2007). On the calculation of energy produced by a PV grid-connected system. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 15, 265–274
- Pettitt, A.N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics* Vol. 28, No. 2: 126
- Pittock, A.B. (2009). *Climate change the science, impacts and solutions second edition*. Collingwood, VIC, Australia: CSIRO Pub.
- Prihartanto. (2008). Pengaruh Fluktuasi Debit terhadap Pola Fluktuasi Karbon di Sungai Surabaya. *Jurnal Sains dan Teknologi* Vol. 10, No. 2: 106-111
- Ralph E.H, S., Schock, R.N., Adegbululgbé, A., Fenhann, J., Konstantinaviciute, I., Moomaw, W., Nimir, H.B., Schlamadinger, B., Torres-Martinez, J., Turner, C., Uchiyama, Y., Vuori, S.J., Wamakonya, N. dan Zhang, X. (2007). Energy Suply. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.; New York: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer.
- Richardson, R.D. dan McNerney, G.M. (1993). Wind energy systems. *Proceedings of the IEEE* Vol. 81, No. 3: 378–389
- Romero-Jordán, D., Peñasco, C. dan del Río, P. (2014). Analysing the determinants of household electricity demand in Spain. An econometric study. *International Journal of Electrical Power dan Energy Systems* Vol. 63: 950–961
- Rowlands, I.H., Kemery, B.P. dan Beausoleil-Morrison, I. (2014). Managing solar-PV variability with geographical dispersion: An Ontario (Canada) case-study. *Renewable Energy* Vol. 68: 171–180
- Rubin, D.B. (2009). *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys*. New York: John Wiley dan Sons
- Singh, M., Chandra, A., (2010). Modeling and Control of Isolated Micro-Hydro Power Plant with Battery Storage System.

- Syahrul. (2008). Prospek Pemanfaatan Energi Angin sebagai Energi Alternatif di Daerah Pedesaan. *Jurnal Media Elektrik* Vol. 3, No. 2: 140-144
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography* Vol. 6, No. 1: 35–39
- Vautard, R., Thais, F., Tobin, I., Bréon, F.-M., de Lavergne, J.-G.D., Colette, A., Yiou, P. dan Ruti, P.M. (2014). Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms. *Nature Communications*. DOI:10.1038/ncomms4196
- Veldhuis, A.J. dan Reinders, A.H.M.E. (2013). Reviewing the potential and cost-effectiveness of grid-connected solar. *Renewable dan Sustainable Energy Reviews* Vol. 27: 315–324.
- Wahid, A. 2009. Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Debit Sungai Mamasa. *Jurnal SMARTek* Vol. 7, No. 3: 204-218

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

KOEFSISIEN KORELASI INDEKS KELANGKAAN ENERGI ANTAR NEGARA

Untuk mengetahui korelasi terjadinya kelangkaan energi antar negara, koefisien korelasi yang diperoleh dari angka biner terdapat pada Tabel A. 1 dan Tabel A. 2.

Tabel A. 1 Koefisien korelasi produksi energi (garis ambang batas harian)

SOLAR												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,30	0,23	0,08	-0,01	0,10	0,04	0,08	0,20	0,08	0,12	0,19
FIN		1,00	0,15	0,07	0,17	0,11	0,01	0,12	0,25	0,03	0,05	0,22
UK			1,00	0,14	0,00	0,33	0,06	0,30	0,19	0,25	0,12	0,15
GER				1,00	0,24	0,24	0,22	0,10	0,02	0,12	0,04	0,02
BR					1,00	0,07	0,18	0,12	0,07	-0,03	-0,02	0,02
FR						1,00	0,13	0,46	0,18	0,30	0,22	0,05
RO							1,00	0,10	0,11	0,11	0,08	-0,02
SPG								1,00	0,36	0,24	0,22	0,11
SPA									1,00	0,09	0,41	0,39
IT										1,00	0,08	0,00
GR											1,00	0,24
TU												1,00
WIND												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,10	0,05	-0,07	0,01	-0,01	-0,08	-0,01	-0,02	-0,05	-0,03	-0,07

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
FIN		1,00	-0,03	0,00	0,08	-0,04	-0,03	-0,06	-0,03	-0,04	-0,02	-0,04
UK			1,00	-0,02	0,00	0,12	0,00	0,06	-0,04	0,08	0,23	0,02
GER				1,00	0,04	0,04	0,15	-0,03	0,02	0,10	0,04	0,12
BR					1,00	0,05	0,14	-0,01	-0,04	0,04	0,07	-0,05
FR						1,00	0,03	0,31	0,03	0,20	0,25	0,07
RO							1,00	0,03	-0,03	0,21	0,14	0,07
SPG								1,00	0,20	0,08	0,14	0,10
SPA									1,00	0,00	-0,04	0,06
IT										1,00	0,32	0,23
GR											1,00	0,05
TU												1,00
HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,33	0,02	0,04	0,09	0,03	-0,04					
FIN		1,00	0,13	0,09	0,08	-0,02	0,00					
UK			1,00	0,20	0,15	0,21	0,09					
GER				1,00	-0,05	0,24	0,07					
BR					1,00	-0,09	0,03					
FR						1,00	0,13					
RO							1,00					
SOLAR + WIND												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,19	0,13	0,04	-0,01	0,07	0,07	0,08	0,13	0,05	0,05	0,06
FIN		1,00	0,08	0,06	0,11	0,05	0,04	0,09	0,17	0,03	0,01	0,11

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
UK			1,00	0,05	-0,03	0,23	0,07	0,21	0,14	0,19	0,19	0,12
GER				1,00	0,17	0,14	0,20	0,05	0,05	0,14	-0,03	0,08
BR					1,00	0,02	0,17	0,08	0,01	0,02	0,01	0,03
FR						1,00	0,04	0,35	0,13	0,20	0,24	0,07
RO							1,00	0,02	0,06	0,17	0,07	0,06
SPG								1,00	0,26	0,15	0,19	0,11
SPA									1,00	0,07	0,26	0,25
IT										1,00	0,16	0,11
GR											1,00	0,17
TU												1,00
SOLAR + WIND + HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,25	0,06	0,04	-0,03	0,05	0,02					
FIN		1,00	0,08	0,10	0,05	0,05	0,01					
UK			1,00	0,07	0,02	0,21	0,05					
GER				1,00	0,08	0,13	0,14					
BR					1,00	-0,04	0,08					
FR						1,00	0,13					
RO							1,00					
SOLAR + HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,27	0,12	0,05	-0,05	0,05	0,06					
FIN		1,00	0,11	0,09	0,05	0,04	0,03					
UK			1,00	0,17	-0,02	0,27	0,06					

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
GER				1,00	0,12	0,22	0,12					
BR					1,00	-0,01	0,07					
FR						1,00	0,21					
RO							1,00					
WIND + HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,27	0,12	0,05	-0,05	0,05	0,06					
FIN		1,00	0,11	0,09	0,05	0,04	0,03					
UK			1,00	0,17	-0,02	0,27	0,06					
GER				1,00	0,12	0,22	0,12					
BR					1,00	-0,01	0,07					
FR						1,00	0,21					
RO							1,00					

Tabel A. 2 Koefisien korelasi produksi energi (garis ambang batas konstan)

SOLAR												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,92	0,85	0,78	0,68	0,75	0,75	0,62	0,65	0,76	0,70	0,79
FIN		1,00	0,82	0,76	0,73	0,75	0,72	0,64	0,65	0,78	0,69	0,78
UK			1,00	0,74	0,62	0,70	0,69	0,61	0,66	0,72	0,67	0,74
GER				1,00	0,72	0,73	0,75	0,58	0,54	0,73	0,62	0,68
BR					1,00	0,63	0,65	0,57	0,54	0,67	0,53	0,61
FR						1,00	0,77	0,69	0,60	0,77	0,69	0,67

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
RO							1,00	0,64	0,60	0,77	0,68	0,65
SPG								1,00	0,75	0,70	0,63	0,58
SPA									1,00	0,65	0,65	0,63
IT										1,00	0,72	0,68
GR											1,00	0,69
TU												1,00
WIND												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,29	0,19	0,06	0,12	0,19	0,14	0,13	0,02	0,16	0,12	0,01
FIN		1,00	0,09	0,06	0,15	0,10	0,10	0,04	0,02	0,12	0,14	0,10
UK			1,00	0,12	0,11	0,21	0,08	0,19	0,04	0,20	0,33	0,00
GER				1,00	0,17	0,26	0,26	0,12	0,11	0,23	0,26	0,05
BR					1,00	0,21	0,21	0,07	0,04	0,16	0,16	0,03
FR						1,00	0,19	0,30	0,11	0,35	0,39	0,07
RO							1,00	0,13	0,03	0,30	0,22	0,14
SPG								1,00	0,27	0,24	0,23	0,15
SPA									1,00	0,03	0,02	0,07
IT										1,00	0,46	0,19
GR											1,00	0,07
TU												1,00
HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,13	-0,11	-0,07	0,07	-0,09	-0,05					
FIN		1,00	0,23	0,19	0,15	0,20	-0,02					

	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
UK			1,00	0,27	0,30	0,35	0,03					
GER				1,00	0,08	0,43	0,06					
BR					1,00	0,15	0,01					
FR						1,00	0,08					
RO							1,00					
SOLAR + WIND												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	SPG	SPA	IT	GR	TU
NO	1,00	0,56	0,46	0,35	0,35	0,41	0,39	0,31	0,29	0,40	0,34	0,35
FIN		1,00	0,40	0,35	0,39	0,36	0,36	0,28	0,30	0,39	0,35	0,40
UK			1,00	0,36	0,31	0,39	0,32	0,34	0,32	0,40	0,44	0,33
GER				1,00	0,38	0,43	0,46	0,28	0,29	0,42	0,37	0,31
BR					1,00	0,36	0,41	0,26	0,26	0,37	0,30	0,30
FR						1,00	0,42	0,44	0,32	0,50	0,49	0,31
RO							1,00	0,33	0,30	0,49	0,38	0,37
SPG								1,00	0,48	0,41	0,37	0,31
SPA									1,00	0,31	0,30	0,31
IT										1,00	0,54	0,39
GR											1,00	0,30
TU												1,00
SOLAR + WIND + HYDRO												
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO					
NO	1,00	0,38	0,22	0,14	0,22	0,21	0,19					
FIN		1,00	0,35	0,32	0,31	0,37	0,21					
UK			1,00	0,33	0,36	0,38	0,22					

GER				1,00	0,30	0,43	0,33	
BR					1,00	0,35	0,25	
FR						1,00	0,30	
RO							1,00	
SOLAR + HYDRO								
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	
NO	1,00	0,49	0,33	0,30	0,30	0,31	0,35	
FIN		1,00	0,49	0,45	0,36	0,44	0,34	
UK			1,00	0,47	0,40	0,47	0,30	
GER				1,00	0,35	0,55	0,39	
BR					1,00	0,33	0,30	
FR						1,00	0,39	
RO							1,00	
WIND + HYDRO								
	NO	FIN	UK	GER	BR	FR	RO	
NO	1,00	0,49	0,33	0,30	0,30	0,31	0,35	
FIN		1,00	0,49	0,45	0,36	0,44	0,34	
UK			1,00	0,47	0,40	0,47	0,30	
GER				1,00	0,35	0,55	0,39	
BR					1,00	0,33	0,30	
FR						1,00	0,39	
RO							1,00	

LAMPIRAN B

CONTOH INSTALASI PLTA, PLTB, DAN PLTS

Contoh gambar instalasi PLTA, PLTB, dan PLTS yang terdapat dalam dokumentasi tim riset sebagai berikut:

1. Instalasi PLTA di Jerman



2. Instalasi PLTB di Norwegia



3. Instalasi PLTS di Spanyol



**BIODATA ALUMNI S-2 TEKNIK LINGKUNGAN ITS
PERIODE WISUDA SEPTEMBER 2015**

1. Nama Lengkap : Handriyanti Diah Puspitarini
2. Nomor Induk Mahasiswa : 3312 201 902
3. Jenis Kelamin : Perempuan
4. Tempat Tanggal Lahir : Surabaya, 10 Desember 1990
5. Agama : Islam
6. Status : Belum Menikah
7. Alamat Email : handriyantidiah@gmail.com
8. Status Pekerjaan : Belum Bekerja
9. Riwayat Pendidikan
 - a. Strata 1 : Teknik Lingkungan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
 - b. Strata 2 : - Teknik Lingkungan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
Surabaya
- Hydrohasards
Université Joseph Fourier Grenoble,
Prancis
- Hydrohasards
University of Thessaly Volos, Yunani
10. Lama Menempuh Studi : Tiga tahun



Surabaya, Juni 2015
Wisudawan

Handriyanti Diah Puspitarini